

Grado Universitario en Ingeniería Mecánica
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Estudio numérico de la
transferencia de calor de un globo
de gran altitud”

Miguel Ángel Buceta Cuéllar

Tutor:

Carolina Marugán Cruz

Leganés, 2018

RESUMEN

En este documento se desarrolla una simulación de la transferencia de calor que ocurre en un globo de gran altitud. Para ello se utilizará el software FLUENT, basado en el método de volúmenes finitos. Se incluirá una comparativa entre el modelo atmosférico utilizado y datos experimentales recogidos. Además, será expuesto un método analítico para calcular el coeficiente convectivo externo y su variación respecto a la altura de órbita.

Después de validar la simulación con estudios previos, se realizarán variaciones en el problema inicial, para estudiar la dependencia de los resultados frente a diferentes parámetros. Por último, se estudiará como la elección del gas interior afecta al problema térmico.

Palabras clave: globo de gran altitud, transferencia de calor, radiación solar, órbita, convección.

ABSTRACT

In this document a heat transfer simulation is conducted during a high-altitude balloon flight. For this purpose, a finite volume method software is used, FLUENT. The document also contains a comparative study of the atmospheric conditions model and the experimental data gathered by a high-altitude balloon. In addition, an analytic method for the external convective coefficient will also be included in the paperwork.

The simulation model validation will be developed using data from previous works. Also, different variations to the problem set-up will be applied to show solution dependencies, including changes such as the inner gas composition.

Keywords: high-altitude balloon, heat transfer, solar radiation, floating conditions, convection.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a Dra. Carolina Marugán Cruz por concederme la oportunidad de realizar el proyecto bajo su tutela. También, a la Universidad Carlos III de Madrid y al Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos por acceder a la realización de este.

En segundo lugar, a todo el equipo de Overlook Horizon High Altitude Balloons, por compartir los datos experimentales recogidos por sus globos y, en definitiva, tratar de hacer esta tecnología más accesible a todo el público interesado.

Finalmente, a mi familia por apoyarme durante estos 4 años, especialmente a mi padre y a mi madre, por creer siempre en mí y no permitir que yo dejara de hacerlo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estructura del documento	2
CAPÍTULO 2: INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA CON GLOBOS DE GRAN ALTITUD	4
2.1 Investigación científica.....	4
2.2 Características técnicas.....	5
CAPÍTULO 3: TRANSFERENCIA DE CALOR.....	7
3.1 El modelo térmico	7
3.2 Conducción.....	8
3.3 Convección	9
3.3.1 Convección externa	10
3.3.2 Convección interna	10
3.4 Radiación	11
3.4.1 Radiación solar	11
3.4.2 Radiación infrarroja.....	14
CAPÍTULO 4: CÁLCULOS PREVIOS	17
4.1 El modelo atmosférico.....	17
4.2 Coeficiente convectivo externo	19
CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN	21
5.1 Geometría	21
5.2 Mallado.....	21
5.3 Ecuaciones de gobierno del fluido.....	22

5.4 Propiedades de los materiales.....	23
5.5 El modelo de radiación y condiciones de contorno.....	24
5.4.1 El modelo de radiación solar	24
5.4.2 El modelo de radiación infrarroja y las condiciones de contorno	25
5.6 Configuración del “Solver”	27
CAPÍTULO 6: VALIDACIÓN DEL MODELO Y RESULTADOS	28
6.1 Validación del modelo.....	28
6.2 Convección natural	33
6.3 Verano vs Invierno	34
6.4 Órbita a 32,000 metros de altitud	36
6.5 Helio vs Hidrógeno.....	37
CAPÍTULO 7: MARCO REGULADOR, PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO.....	39
7.1 Marco Regulador	39
7.2 Planificación	39
7.4 Presupuesto.....	40
CAPÍTULO 8: CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS	42
8.1 Conclusión.....	42
8.2 Trabajos Futuros	42
BIBLIOGRAFÍA	44
ANEXO A. UDF PARA RADIACIÓN INFRARROJA	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Globo de Gran Altitud [2]	1
Figura 2. Esquema de un globo científico	4
Figura 3. Zero pressure ballon [7]	5
Figura 4. Super pressure ballon [7]	6
Figura 5. Cambios en la altura de órbita según el tipo de globo [8]	6
Figura 6. Transferencia de calor en un globo de gran altitud	7
Figura 7. Transferencia de calor unidimensional por conducción	8
Figura 8. Ángulos notables en la calculadora solar. [12]	12
Figura 9. Ángulo formado por la radiación solar y el vector unitario de cada elemento. [5]	13
Figura 10. Datos experimentales y teóricos de la temperatura en función de la altura	18
Figura 11. Datos experimentales y teóricos de la temperatura en función de la altura	18
Figura 12. Coeficiente convectivo externo en función de la altitud de órbita del globo	20
Figura 13. Mallado del globo	21
Figura 14. Refinamiento del mallado	22
Figura 15. Modelo de radiación solar	24
Figura 16. Configuración del Solar Calculator	25
Figura 17. Configuración "Wall_Thermal"	26
Figura 18. Configuración "Wall_Radiation"	26
Figura 19. Configuración de módulo "Solver"	27
Figura 20. Distribución de la temperatura en el globo a las 09:00 AM.....	29

Figura 21. Distribución de la temperatura en el globo a las 09:00 AM según Kun Zhao [5].....	29
Figura 22. Distribución de la temperatura en el globo a las 12:00 PM	30
Figura 23. Distribución de la temperatura en el globo a las 12:00 PM según Kun Zhao [5].....	30
Figura 24. Distribución de la temperatura en el globo a las 01:00 AM.....	31
Figura 25. Distribución de la temperatura en el globo a las 01:00 AM según Kun Zhao [5].....	31
Figura 26. Máxima y mínima temperatura del globo durante su órbita	32
Figura 27. Máxima y mínima temperatura del globo durante su órbita según Kun Zhao [5].....	32
Figura 28. Contorno de Temperatura en el plano XY a las 12:00 PM.....	33
Figura 29. Vector velocidad de las partículas del globo en el plano XY a las 12:00 PM	34
Figura 30. Distribución de la temperatura en Verano a las 12:00 PM.....	35
Figura 31. Distribución de la temperatura en Invierno a las 12:00 PM.....	35
Figura 32. Incidencia de los rayos solares en invierno y verano [19]	36
Figura 33. Temperatura media y máxima de la capa superficial a diferentes alturas de órbita.....	37
Figura 34. Máxima temperatura en el exterior e interior del globo durante la simulación con hidrógeno	38
Figura 35. Diagrama de Gantt	40

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PROPIEDADES DEL FLUJO DE AIRE ATMOSFÉRICO [17].....	19
TABLA 2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LA SIMULACIÓN.....	23
TABLA 3. PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DE LA ÓRBITA A 20,000 METROS.....	28
TABLA 4. PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS PARA UNA ÓRBITA A 32,000 METROS DE ALTITUD	36
TABLA 5. COSTE DE LA MANO DE OBRA	41
TABLA 6. COSTE DEL MATERIAL UTILIZADO.....	41

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Los globos de gran altitud son globos especialmente diseñados para llevar una carga hasta elevadas capas de la atmósfera, concretamente pueden alcanzar hasta 40,000 metros de altura sobre el nivel del mar [1]. Están hechos principalmente de látex o polietileno y su gas interior suele ser helio o hidrógeno, siendo el último el menos utilizado por su alta inflamabilidad.



Figura 1. Globo de Gran Altitud [2]

Debido a su simple estructura y fácil puesta en marcha, son una práctica y sencilla herramienta para realizar estudios científicos en la estratosfera.

Sobre el rendimiento térmico de los globos se han desarrollado numerosos estudios en los últimos años. Cathey [3], creó un modelo térmico y dinámico para globos de gran altitud utilizados en la NASA en el año 2009. En base a este modelo Q. Liu [4], planteó un modelo térmico y dinámico simplificado, capaz de establecer la trayectoria y la temperatura del gas durante su movimiento. Además, han sido publicados varios artículos sobre problemas térmicos acontecidos en globos meteorológicos como el publicado por K. Zhao [5], en el que se realiza un análisis numérico sobre el sobrecalentamiento.

En este documento se tratará de evaluar las condiciones térmicas operativas para un futuro vuelo, obteniendo un modelo capaz de simular la órbita durante 24 horas en la estratosfera.

Este estudio aprovechará los nuevos programas y tecnologías, que nos facilitan una simplificación inmediata del problema, centrándose únicamente en el fenómeno de transferencia de calor. Para ello se propone una simulación en régimen transitorio (propiedades atmosféricas cambiantes), utilizando el software ANSYS para la modelización del problema y más concretamente FLUENT para la resolución del problema físico.

1.2 Objetivos

Los objetivos de este estudio son los siguientes:

- Describir con un modelo computacional el fenómeno de transferencia de calor de un globo científico durante su órbita.
- Evaluar el modelo atmosférico que se empleará en la simulación.
- Analizar la influencia de los diferentes modos de transferencia de calor que actúan en el problema.
- Estudiar la dependencia del problema a diferentes parámetros (altitud, día, hora, ...).
- Analizar las principales diferencias entre el empleo de helio e hidrógeno en el llenado de los globos de gran altitud.

1.3 Estructura del documento

El documento está compuesto de un total de 8 capítulos, que pueden ser agrupados en cuatro bloques en función de su contenido:

1. **Introducción.** Comprendida entre los capítulos 1 y 2, siendo el último una introducción específica a los globos de gran altitud.
2. **Teoría y cálculos previos.** Bloque que incluye los capítulos 3 y 4. El primero explica la teoría del problema, haciendo hincapié en los modos de transferencia de calor que intervienen en el mismo. El segundo estudia el modelo atmosférico que se empleará en la simulación y el modelo analítico para estimar el coeficiente convectivo externo del problema.

3. **Simulación y resultados.** Contiene los capítulos 5 y 6, en los cuáles se destaca la configuración de la simulación, se procede a la validación de esta y además se muestran los resultados de los diferentes problemas planteados.
4. **Cierre.** Bloque al que pertenecen los capítulos 7 y 8. En él se detalla el marco regulador, la planificación del proyecto, el presupuesto de este y se finaliza el trabajo realizando una valoración sobre el mismo.

CAPÍTULO 2: INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA CON GLOBOS DE GRAN ALTITUD

En este capítulo se profundizará en los globos de gran altitud, tanto su composición como las partes que conforman el conjunto que posteriormente será enviado a la atmósfera.

2.1 Investigación científica

Debido a su reducido coste los globos de gran altitud son un medio ideal para realizar experimentos entre la estratosfera y la troposfera. Para ello se une al mismo una carga que contiene todo el equipamiento (cámaras, ordenador de a bordo, sensores térmicos, etc.) necesario para realizar los experimentos. Además, se añade un paracaídas para controlar la velocidad en el descenso de la carga que en ocasiones puede alcanzar hasta los 2 kg de peso.

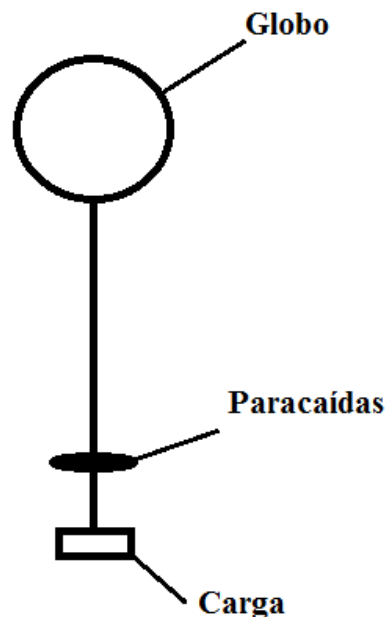


Figura 2. Esquema de un globo científico

El funcionamiento de un globo científico es sencillo. El globo asciende hasta alcanzar una altura máxima, dónde comienza a orbitar alrededor de la Tierra. Gracias a un sistema de seguimiento que se incorpora en la carga (ver **Figura 2**), es posible obtener datos en

tiempo real o almacenarlos en un ordenador de a bordo, y en los más sofisticados, emitir datos en tiempo real. Una vez concluido su vuelo el globo desciende de manera controlada utilizando el paracaídas inmediatamente anterior a la carga (ver **Figura 2**).

Los experimentos más comunes incluyen sensores de temperatura y presión, además de cámaras de vídeo para recoger todo el viaje. Es un vehículo perfecto para realizar cualquier tipo de medición, desde radiación [6] hasta evaluar la evolución de los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera.

2.2 Tipos de Globos

El material utilizado para los globos suele ser en la mayoría de los casos el polietileno, sin embargo, es necesario distinguir los tipos de globos utilizados para orbitar en la estratosfera en función de su geometría [7].

- **Zero Pressure Ballon:** Este tipo de globos tiene una abertura en la parte inferior que permite que el gas salga del globo. Esta hace que la presión del gas interior no crezca durante la expansión producida en el ascenso.

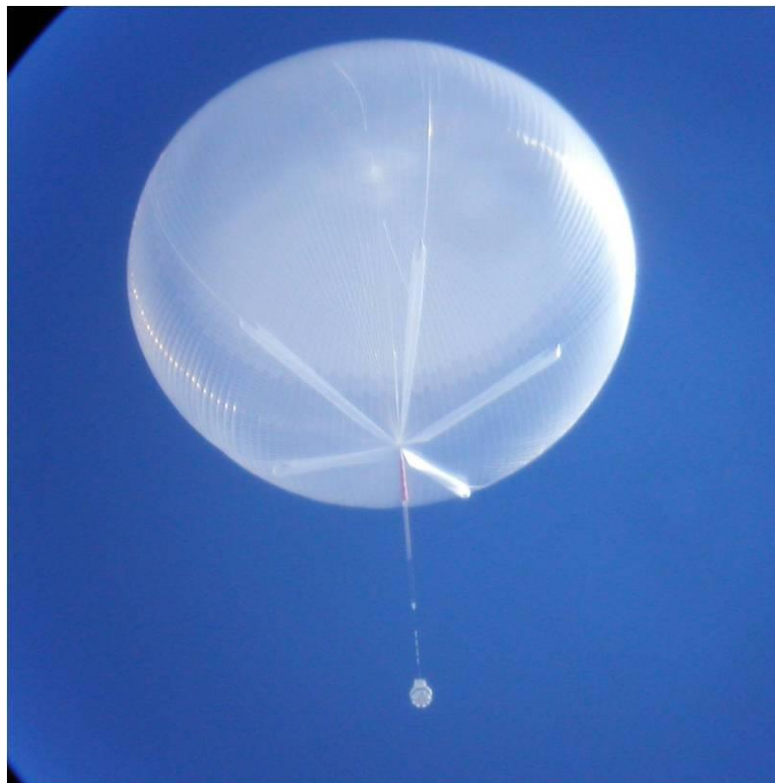


Figura 3. Zero pressure ballon [7]

- **Super Pressure Balloon:** Son globos completamente sellados, por tanto, la presión del gas aumenta cuando se produce una expansión. Al reducirse la pérdida de gas son utilizados cuando se requieren misiones de mayor duración (tanto en distancia como en tiempo).



Figura 4. Super pressure balloon [7]

La órbita se ve alterada por las variaciones de temperatura entre el día y la noche. Durante el día se alcanzan temperaturas más altas que provocan una expansión del gas, lo que reduce su densidad y; finalmente, eleva la altura de órbita. Ambos globos sufren variaciones, sin embargo, el “Super pressure balloon” mantiene una órbita más estable.



Figura 5. Cambios en la altura de órbita según el tipo de globo [8]

CAPÍTULO 3: TRANSFERENCIA DE CALOR

En este capítulo se profundizará en los diferentes modos de transferencia de calor presentes durante la órbita del globo en la estratosfera. Primero se establecerá el modelo con los diferentes modos que intervienen en el mismo, para luego realizar una breve explicación sobre ellos.

3.1 El modelo térmico

Durante su órbita se encuentran con condiciones atmosféricas cambiantes (variación de temperatura, presión, vientos, radiación, ...), es por esto, que se pueden dar grandes variaciones de temperaturas en el globo a lo largo del día. En el artículo escrito por el autor K. Zhao [5] se mencionó que, en condiciones críticas, se puede llegar a dar sobrecalentamiento en la superficie. Esto provoca una expansión del gas interior, que puede llegar a romper la capa superficial del globo.

Para adecuar un modelo térmico que represente la transferencia de calor ocurrida en un globo durante su ascenso, es conveniente señalar todos los modos de transferencia de calor que intervienen durante el mismo. Es conveniente señalar que todos estos modos están fuertemente afectados por las condiciones climatológicas, y que específicamente, en el estudio se ha supuesto viento constante durante todo el período.

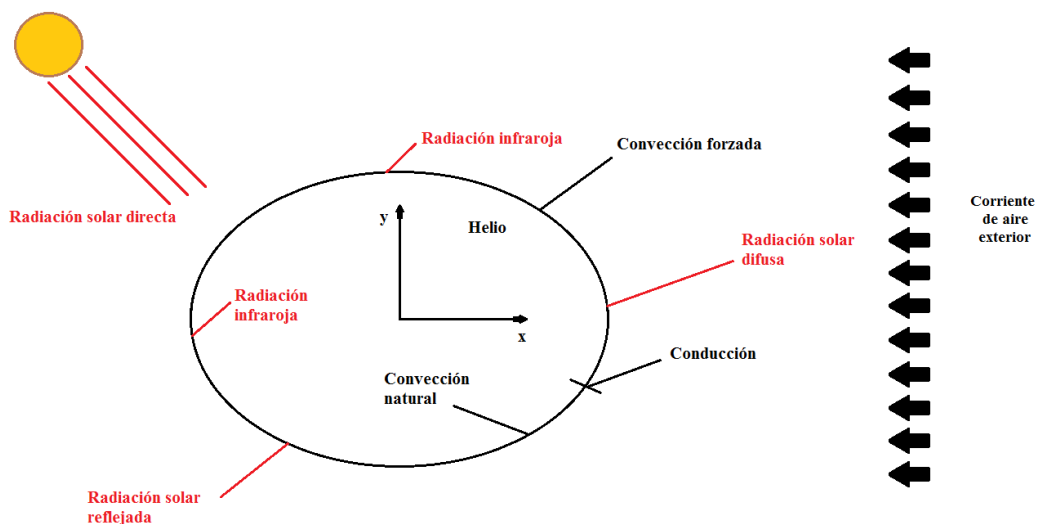


Figura 6. Transferencia de calor en un globo de gran altitud

Como se aprecia en la **Figura 6**, existen varios flujos de calor que afectan al globo, radiación solar (directa y difusa), radiación infrarroja (exterior e interior), conducción y convección (forzada y natural). Si dividimos la superficie del globo en N elementos triangulares, el balance de energía en régimen transitorio para el elemento i ésimo está definido por:

$$M_i c \frac{dT_i}{dt} = Q_{Conducción,i} + Q_{Convección,i} + Q_{Radiación\ solar,i} + Q_{Radiación\ infrarroja,i} \quad (3.1)$$

Dónde M_i es la masa del elemento i , T_i es la temperatura del elemento c es el calor específico del material del globo, $Q_{Conducción}$ es el calor por segundo absorbido por conducción, $Q_{Convección}$ es el calor por segundo absorbido por convección, $Q_{Radiación}$ es el calor que disipa o absorbe el helio por radiación y $\frac{dT_{He}}{dt}$ es la variación de la temperatura media del Helio por unidad de tiempo.

3.2 Conducción

Cuando hablamos del fenómeno de conducción nos referimos a la transferencia de calor que se produce a través de un medio. Si realizamos un corte de la sección del material de la capa exterior, con un plano de espesor e y llamamos T_a a la temperatura del aire en un instante de tiempo t , T_{He} a la temperatura del helio en ese mismo instante de tiempo, T_{se} es la temperatura de la superficie exterior del globo y T_{si} es la temperatura de la superficie interior del globo. La representación bidimensional sería la siguiente:

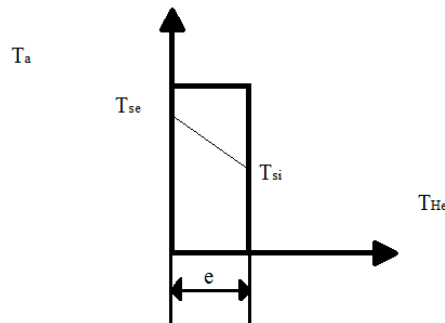


Figura 7. Transferencia de calor unidimensional por conducción

Cabe destacar que en la **Figura 7**, se ha supuesto que la temperatura del aire era mayor en dicho instante de tiempo de manera que la misma decae a lo largo del espesor del sólido. Esta pérdida o ganancia de temperatura está definida por la conocida “Ley de Fourier”, definiendo el flujo de calor para una pared plana unidimensional como:

$$q''_x = k \frac{\Delta T}{e} \quad (3.2)$$

Dónde k es la conductividad térmica del material y ΔT es la diferencia de temperaturas entre el aire y el helio.

3.3 Convección

La convección es una transferencia de calor debida al movimiento de un fluido sobre una superficie (aunque el movimiento de las moléculas del fluido también influye). Como la superficie que analizamos tiene dos fluidos diferentes en contacto es necesario diferenciar entre convección interna y externa, además, como se ve en el esquema (ver **Figura 6**) distinguimos otros dos tipos de convección: forzada y natural. El flujo de calor para todos los casos se puede definir numéricamente utilizando la “Ley de enfriamiento de Newton”:

$$q_{ext}'' = h_{ext}(T_{air} - T_{se}) \quad (3.3)$$

$$q_{int}'' = h_{int}(T_{si} - T_{He}) \quad (3.4)$$

Dónde h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, T_s es la temperatura de la superficie (T_{se} exterior y T_{si} interior) del globo y $T_{a/He}$ es la temperatura del fluido en contacto con la misma (aire para forzada y helio para natural). Hay que resaltar que todos los parámetros ya citados y los que definen las ecuaciones posteriores dependen del tiempo. La ecuación describe el flujo para todos los casos de transferencia de calor por convección; sin embargo, es necesario analizar de manera individual cada tipo de convección, dado que su coeficiente convectivo tiene un valor diferente.

3.3.1 Convección externa

- La convección forzada externa es aquella que es originada por un medio externo, en nuestro caso se trata de los vientos atmosféricos los que la provocan. Donde el coeficiente convectivo puede ser aproximado por la siguiente ecuación [9]:

$$h_{for} = \frac{Nu}{L} k_a \quad (3.5)$$

Dónde Nu es el número de Nusselt, L es la longitud característica de la superficie en este caso será el diámetro del globo y k_a es la conductividad térmica del aire. Para el cálculo del número de Nusselt se hará de acuerdo con la siguiente correlación [10]:

$$\frac{Nu_{for}}{Pr^{0.4}} = \frac{2}{Pr^{0.4}} + \left(0.4Re^{\frac{1}{2}} + 0.006Re^{\frac{2}{3}} \right) \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.6)$$

- La convección libre externa es originada por las diferencias de temperatura que acontecen a lo largo del flujo de aire, lo que provoca una variación de densidades en las moléculas provocando su movimiento. El coeficiente convectivo, el número de Nusselt y el número de Grashof pueden ser aproximados por las siguientes ecuaciones [9]:

$$Gr_a = \frac{\rho_a^2 g |T_{se} - T_a| D^3}{T_a \mu_a^2} \quad (3.7)$$

$$Nu_{libre} = 2 + 0.45(Gr_a Pr_a)^{0.25} \quad (3.8)$$

$$h_{libre} = \frac{Nu_{libre}}{L} k_a \quad (3.9)$$

Dónde además de los parámetros ya mencionados anteriormente, Re es el número de Reynolds del flujo de aire y D es el diámetro del globo.

3.3.2 Convección interna

La convección libre interna se debe a las diferencias de temperatura presentes en el helio, lo que origina una variación de densidad en las moléculas de este derivando nuevamente

en un movimiento. El coeficiente convectivo puede ser aproximado por la siguiente ecuación [9]:

$$h_{libre,i} = 0.13 * k_{He} \left(\frac{\rho_{He}^2 g |T_{si} - T_{He}| Pr_{He}}{T_{He} \mu_{He}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.10)$$

Dónde k_{He} es la conductividad térmica del helio, ρ_{He} es la densidad del helio, μ_{He} es la viscosidad cinemática del helio y Pr_{He} es el número de Prandtl del helio.

3.4 Radiación

La radiación total del globo puede ser dividida en directa, difusa, reflejada e infrarroja. Las tres primeras hacen alusión a toda aquella radiación emitida por el sol, para implementarlas en el problema se utilizará el modelo de “Solar Ray Traicing” y la calculadora solar integrada en el programa de simulación (FLUENT) [11]. Sin embargo, la última hace alusión a la radiación emitida por la superficie terrestre y la atmósfera.

3.4.1 Radiación solar

Como ya se ha mencionado, la calculadora Solar de FLUENT es un modelo predefinido por ANSYS capaz de obtener la irradiación que incide directamente en la superficie del globo, independientemente del ángulo con el que incida.

El flujo de radiación directa puede ser definido por la siguiente ecuación.

$$I_{directa} = I_0 d_m^2 \tau_{atm}^n \quad (3.11)$$

Dónde I_0 representa la radiación solar media por metro cuadrado, d_m es el término corrector debido a la disipación de la radiación en la atmósfera (normalmente tiene valores entre 0.6 y 0.7 [5]) y τ_{atm}^n representa la transmitancia de la atmósfera. El término corrector y el exponente n están definidos por las siguientes ecuaciones:

$$d_m = 1.000110 + 0.03422 \cos(\gamma) + 0.001290 \sin(\gamma) + 0.000719 \cos(2\gamma) + 0.000077 \sin(2\gamma) \quad (3.12)$$

$$n = \frac{1}{\cos(\beta) + 0.1500(93.885 - \beta)^{-1.253}} \frac{P_{atm}}{101325} \quad (3.13)$$

Siendo γ el ángulo del día solar y β el ángulo de zenith. Además, serán necesarios para el modelo los siguientes: el ángulo de latitud (ϕ), el ángulo de inclinación solar (ζ), el ángulo de la hora solar (ω) y el ángulo de azimuth (ψ). Todos estos ángulos se pueden apreciar en la siguiente imagen.

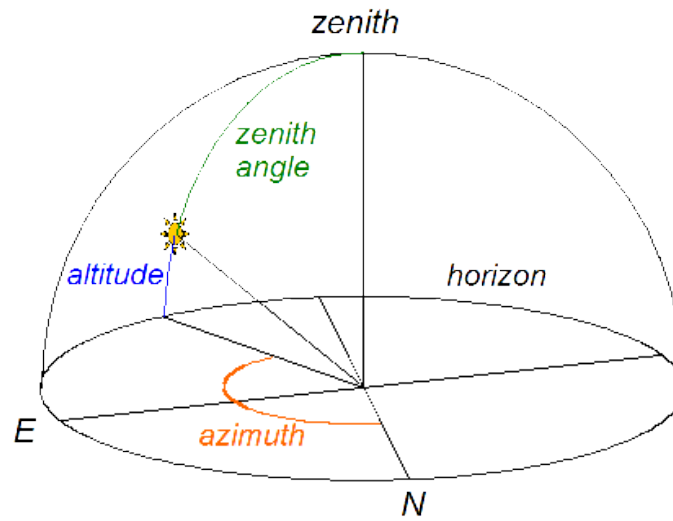


Figura 8. Ángulos notables en la calculadora solar. [12]

El flujo de radiación difusa es directamente proporcional a la radiación solar media por metro cuadrado y dependiente de la transmitancia de la atmósfera:

$$I_{difusa} = \frac{I_0 \tau_{atm}^n (1 - \tau_{atm}^n)}{2(1 - 1.14 \ln(\tau_{atm}))} \quad (3.14)$$

El flujo de radiación reflejada está descrito por la siguiente ecuación:

$$I_{reflejada} = \chi I_{directa} \quad (3.15)$$

El flujo de radiación reflejada es directamente proporcional al flujo de radiación directa multiplicado por, χ coeficiente cuyo valor depende de las condiciones del cielo (aproximadamente 0.18 para cielos despejados y 0.57 para cielos nublados).

El calor absorbido por un elemento del globo varía en función del ángulo formado por su normal y el vector de la radiación solar. Es por esto, que todos aquellos elementos que se encuentran en sombra no absorberán la radiación solar directa. Por ello cuando calculemos el calor absorbido por el mismo debemos tener en cuenta su disposición espacial en el globo.

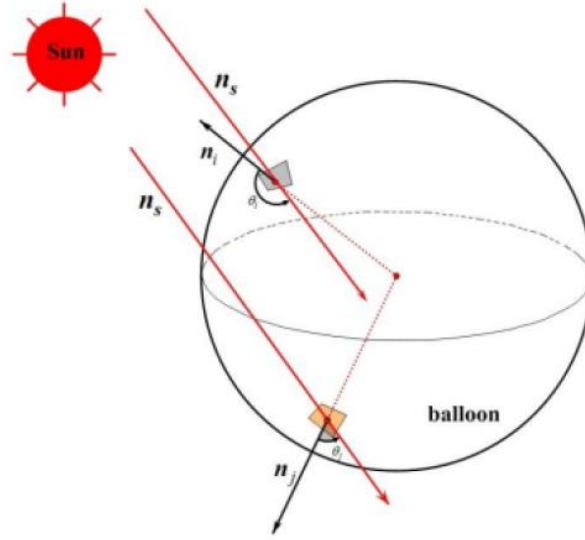


Figura 9. Ángulo formado por la radiación solar y el vector unitario de cada elemento. [5]

Como se aprecia en la imagen, el vector \mathbf{n}_s es el vector unitario de la radiación solar, el vector \mathbf{n}_i es el vector unitario del elemento i y el ángulo formado entre los mismos es θ_i . De esta manera, si $0 \leq \theta_i \leq \frac{\pi}{2}$ el elemento i está bajo la sombra de otros y aquellos elementos que verifiquen $\frac{\pi}{2} \leq \theta_i \leq \pi$ se encuentran expuestos al sol.

El vector \mathbf{n}_s puede ser descrito de la siguiente manera:

$$\mathbf{n}_s = -\cos\beta \cdot \cos\psi \cdot \mathbf{i} - \cos\beta \cdot \sin\psi \cdot \mathbf{j} - \sin\beta \cdot \mathbf{k} \quad (3.16)$$

Dónde ψ (el ángulo de azimuth) es:

$$\psi = \arccos \frac{\sin\beta \cdot \sin\phi - \sin\xi}{\cos\beta \cdot \cos\phi} \quad (3.17)$$

Para calcular el calor absorbido por el elemento i , es necesario definir previamente la función λ , que nos dará un valor de 0 si $0 \leq \theta_i \leq \frac{\pi}{2}$ y un valor de 1 si $\frac{\pi}{2} \leq \theta_i \leq \pi$, siendo θ_i (en este caso), el ángulo formado por los vectores característicos de la función.

$$\lambda(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2) = \frac{|\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2| - \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2}{2|\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2|} \quad (3.18)$$

De esta manera podemos describir el calor absorbido por radiación directa, el calor absorbido por radiación difusa y el calor absorbido por radiación reflejada como:

$$Q_{directa,i} = \lambda(\mathbf{n}_s, \mathbf{n}_i) |\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{n}_i| \alpha_s A_i I_{directa} \quad (3.19)$$

$$Q_{difusa,i} = \alpha_s A_i I_{difusa} \quad (3.20)$$

$$Q_{reflejada,i} = \lambda(\mathbf{n}_g, \mathbf{n}_i) |\mathbf{n}_g \cdot \mathbf{n}_i| \alpha_s A_i I_{reflejada} \quad (3.21)$$

Dónde α_s es la absortancia del material que conforma la superficie del globo, A_i es el área del elemento i y el vector unitario \mathbf{n}_g es el vector de la radiación emitida por la tierra, incluyendo la reflejada y la infrarroja. Nótese que el calor absorbido por radiación difusa es el mismo para todos los elementos, esto se debe, a que dicha radiación proviene únicamente de la atmósfera en la que se encuentra.

De esta manera podemos definir el calor total absorbido por radiación solar del elemento i como:

$$Q_{Radiación\ solar,i} = Q_{directa,i} + Q_{difusa,i} + Q_{reflejada,i} \quad (3.22)$$

3.4.2 Radiación infrarroja

El calor absorbido por radiación infrarroja es gran parte del calor total absorbido por el globo, especialmente durante la noche cuando no hay ninguna superficie iluminada por el sol. La radiación infrarroja es aquella emitida por la superficie terrestre hacia la atmósfera. Aunque en realidad el material que conforma el exterior del globo también emite radiación infrarroja después de haber absorbido la radiación solar, este hecho no

será tenido en cuenta para los resultados debido a que su espesor es mucho menor en comparación con el volumen del globo completamente inflado [13].

El calor absorbido por radiación infrarroja hace uso también de la función λ o función sombra. Esto se debe a la radiación solar que llega a la superficie terrestre y provoca que esta emita parte de dicha radiación en forma de radiación infrarroja. El calor que se transmite por dicho proceso puede ser descrito por la siguiente ecuación:

$$Q_{IRsuperficie,i} = \lambda(\mathbf{n}_s, \mathbf{n}_i) |\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{n}_i| \alpha_s A_i I_{superficie} \quad (3.23)$$

Dónde el flujo de radiación infrarroja terrestre está definido por:

$$I_{IRsuperficie} = \tau_{ir,atm} \varepsilon_{superficie} \sigma T_{superficie}^4 \quad (3.24)$$

Para la $T_{superficie}$ consideramos condiciones de atmósfera estándar (288.15K), $\varepsilon_{superficie}$ es la emisividad de la superficie (se considerará como 0.95), σ es la constante de Stefan-Boltzmann y $\tau_{ir,atm}$ es la transmisividad infrarroja del aire, que puede ser calculada de la siguiente manera:

$$\tau_{ir,atm} = 1.716 - 0.5 \cdot \left(e^{-0.65 \frac{P_{air}}{P_0}} + e^{-0.95 \frac{P_{air}}{P_0}} \right) \quad (3.25)$$

Dónde P_{air} es la presión del aire en la altura de órbita y P_0 es la presión en la superficie terrestre.

El calor absorbido por la radiación infrarroja del aire atmosférico depende de la temperatura a la que se encuentre el flujo irradiado por el mismo. Se puede simplificar el problema considerando el cielo a una determinada altura como un cuerpo negro y así, poder definir el calor absorbido con la ley de Stefan-Boltzmann de manera simple. La temperatura de la atmósfera a esa determinada altura como cuerpo negro es calculada de la siguiente manera:

$$T_{negro} = 0.052 T_{atm}^{1.5} \quad (3.26)$$

El calor absorbido de esta manera es, por tanto:

$$Q_{IRatm,i} = \varepsilon_{mat} A_i \sigma T_{cnegro}^4 \quad (3.27)$$

Además, como ya se ha mencionada la radiación absorbida por la superficie del globo y aquella que emite no serán consideradas debido a que son prácticamente despreciables frente al resto de componentes.

$$Q_{infrarroja,i} = Q_{IRsuperficie,i} + Q_{IRatm,i} \quad (3.28)$$

CAPÍTULO 4: CÁLCULOS PREVIOS

En este capítulo se explicarán en detalle los cálculos previos necesarios antes de realizar la simulación. Para ello se discutirá el modelo atmosférico en detalle y el cálculo del coeficiente convectivo debido a flujo externo en el globo.

4.1 El modelo atmosférico

Para poder realizar una simulación del globo en condiciones de órbita es necesario determinar primero la temperatura y presión presentes en la altitud de esta. Son numerosos los modelos que describen estas propiedades en las diferentes regiones de la atmósfera (“US. Standard atmosphere model”, Sou and He [14], ...), para este informe se ha considerado el modelo de la atmósfera terrestre de la NASA [15]. Dicho modelo está descrito de la siguiente manera (para temperatura T en K, Altitud h en m y presión P en Pa):

$$T_{aire} \begin{cases} 288.15 - 0.00649 \cdot h & \text{if } h \leq 11000m \\ 216.75 & \text{if } 11000 < h \leq 25000m \\ 141.94 + 0.00299 \cdot h & \text{if } h > 25000m \end{cases} \quad (4.1)$$

$$P_{aire} \begin{cases} 101290 \cdot \left[\frac{T_{aire}}{288.08} \right]^{5.256} & \text{if } h \leq 11000m \\ 22650 \cdot e^{(1.73 - 0.000157 \cdot h)} & \text{if } 11000 < h \leq 25000m \\ 2488 \cdot \left[\frac{T_{aire}}{216.6} \right]^{-11.388} & \text{if } h > 25000m \end{cases} \quad (4.2)$$

Aunque este modelo es muy robusto y se acerca con gran precisión a los resultados reales, gracias al grupo Overlook Horizon High Altitude Balloons [16], ha sido posible contrastar este modelo con datos reales tomados en cuatro misiones diferentes de globos de gran altitud. Las cuatro misiones (OLHZN 12,13,14 Y 15) han sido realizadas con el mismo itinerario, material y carga, en ellas el globo asciende hasta una altura superior a los 30,000 metros para más tarde realizar un descenso controlado. A continuación, se exponen dos gráficas que contrastan los datos experimentales con los datos teóricos del modelo.

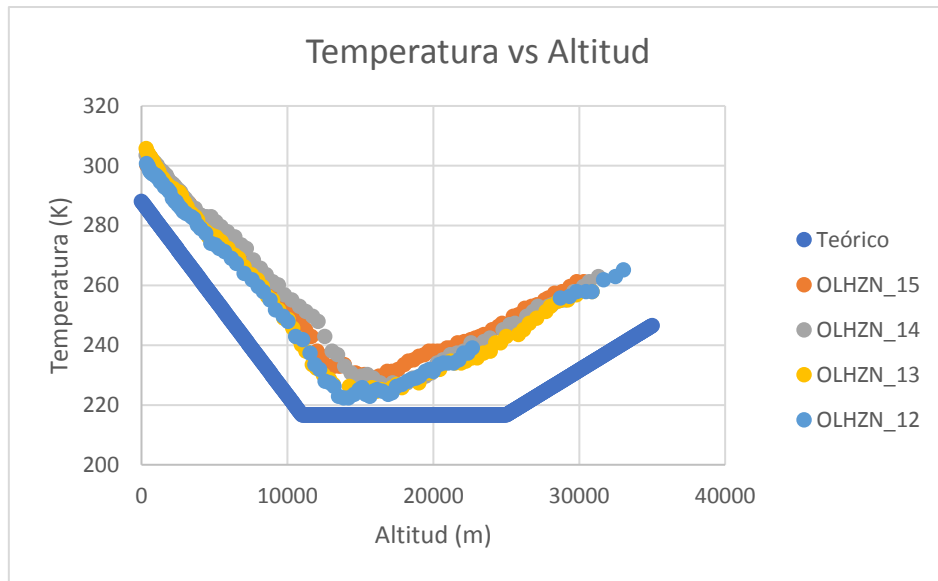


Figura 10. Datos experimentales y teóricos de la temperatura en función de la altura

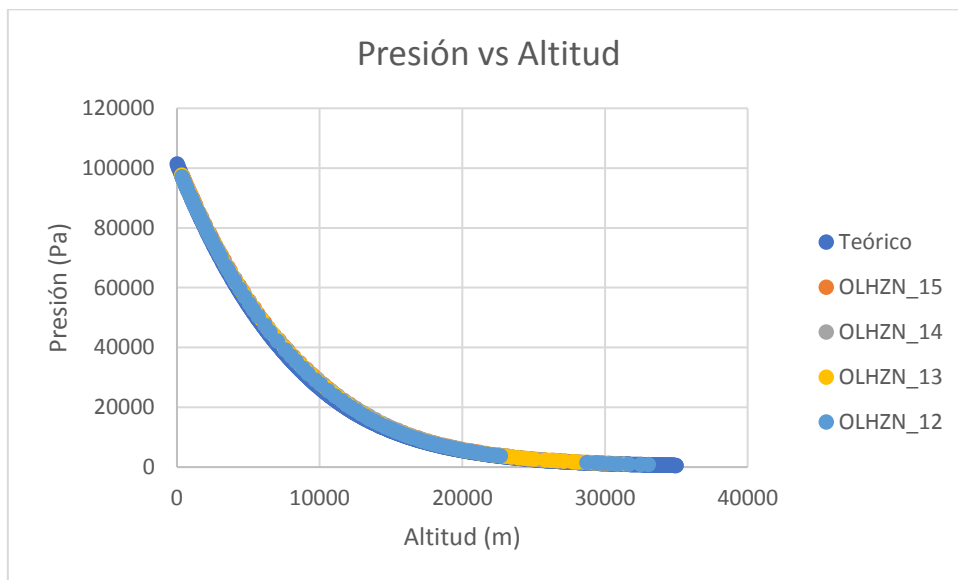


Figura 11. Datos experimentales y teóricos de la temperatura en función de la altura

En la **Figura 10** se observa que la temperatura recogida por el sensor es superior durante todo el ascenso y en las cuatro misiones. Esto se debe principalmente al calor generado dentro de la carga por todos los útiles electrónicos (ordenador de a bordo, cámara, ...) que eleva la temperatura en el interior de la caja y provoca que el sensor térmico recoja una temperatura algo superior a la real. Además, se observa que la tendencia del modelo muestra con fidelidad lo que sucede en la realidad.

En lo referido a la **Figura 11**, no hay mucho que comentar dado que los datos reales y los teóricos se corresponden a lo largo de las diferentes altitudes. Cabe destacar que se ha detectado un fallo en la toma de datos en la misión “OLHZN_12”, dado que en torno a los 25000 metros deja de recoger datos durante un breve período.

4.2 Coeficiente convectivo externo

El cálculo del coeficiente convectivo externo será de vital importancia para definir las condiciones de contorno en el programa de simulación. Cabe destacar que las propiedades del aire han sido tomadas como lo hace FLUENT, es decir, densidad variable definida por la ley de gas ideal y el resto constantes y definidas por su librería:

$$\rho_{air} = \frac{P_{air}}{\frac{R}{M_w} T_{air}} \quad (4.3)$$

TABLA 1. PROPIEDADES DEL FLUJO DE AIRE ATMOSFÉRICO [17]

Cp (J/Kg·K)	1006.43
μ (N·s/m ²)	1.7894e-5
k (W/m·K)	0.0242
Mw (g/mol)	28.966
v (m/s)	25

Es necesario hacer un inciso en la densidad, dado que, aunque para el cálculo del coeficiente se haya obtenido de esta manera en realidad durante la simulación se tendrá en cuenta la presión atmosférica y la presión local generada en dicha parte del fluido (esto solamente se aplica para el helio, dado que el flujo de aire como mencionará en la geometría no se simulará). Para realizar el cálculo será necesario calcular los números de Nusselt de convección libre y forzada (Ecuaciones 3.6 y 3.8), para más tarde calcular el Nusselt total del problema y con él el coeficiente. Este proceso se ve reflejado en las siguientes ecuaciones [18]:

$$Nu_T^4 = Nu_{for}^4 + Nu_{libre}^4 \quad (4.4)$$

$$h_{ext} = \frac{k_a}{D} Nu_T \quad (4.5)$$

A continuación, se exponen los datos obtenidos para una altitud comprendida entre 0 y 32000 metros.

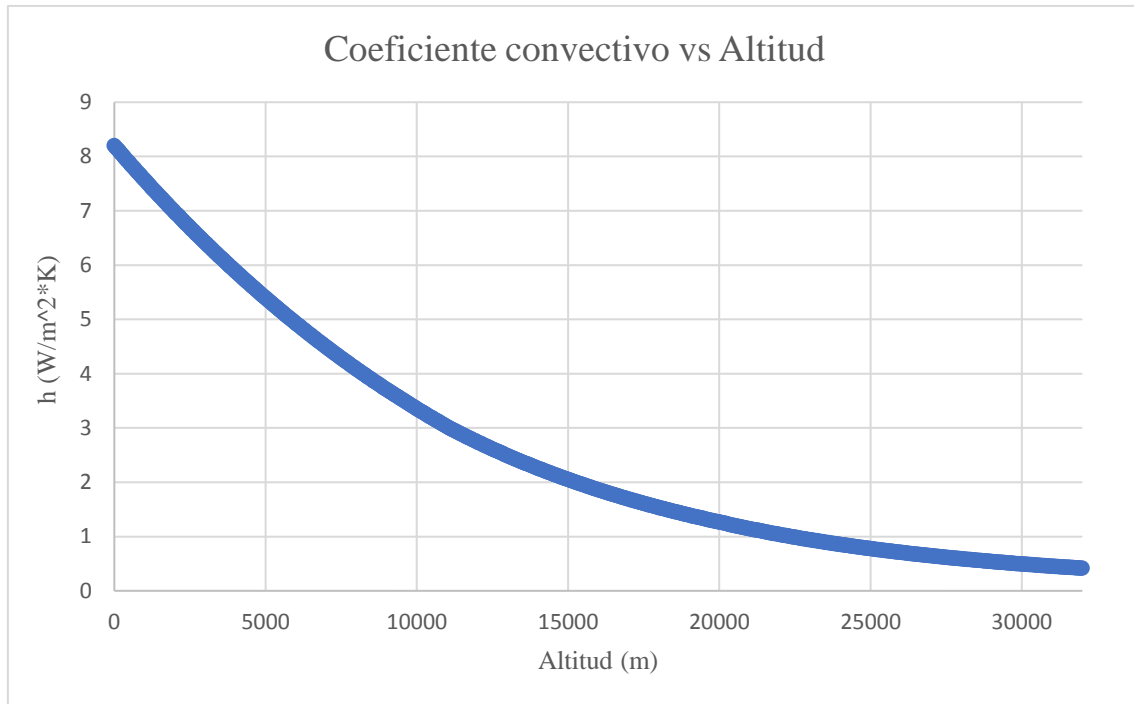


Figura 12. Coeficiente convectivo externo en función de la altitud de órbita del globo

En la **Figura 12**, se puede observar como el coeficiente convectivo decrece a medida que nos acercamos a capas superiores de la estratosfera. Esto indica que el material de la superficie tiene una mayor dificultad para disipar calor a mayor altura, lo que invita a plantear la hipótesis de una mayor temperatura media (durante 24 horas), en alturas superiores

Esto será discutido con detenimiento en el Capítulo 6 (Validación del modelo y resultados).

CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN

Los contenidos de este capítulo desarrollan todos los pasos que se han seguido para modelizar el problema con ANSYS (mallado y geometría) y más tarde importarlo a FLUENT para realizar la simulación de la transferencia de calor.

5.1 Geometría

La geometría elegida para el problema ha sido un único volumen esférico, cuyo radio es 15 metros (en el siguiente capítulo se detallará la razón de dicho valor). Esto se debe a la facilidad para más tarde procesar los cálculos y las herramientas que nos proporciona FLUENT para definir las condiciones de contorno. Ver **Figura 13**.

5.2 Mallado

El mallado de la geometría es sencillo debido a la simplicidad de esta. Primeramente, se ha desarrollado una malla con elementos triangulares (tetraedros) con un total de 473,710 elementos. Sin embargo, tras realizar otra simulación con una malla de menor resolución (67400 elementos) y obtener resultados iguales, se decidió utilizar esta última porque disminuía muy notablemente el coste computacional.

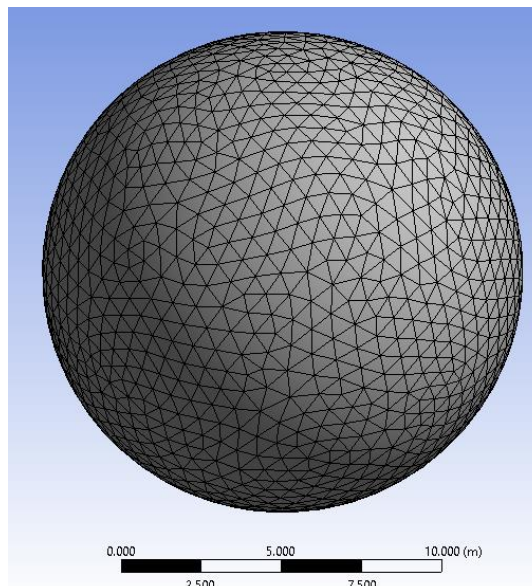


Figura 13. Mallado del globo

Un análisis más exhaustivo mostró que los resultados convergían en torno a los 50,000 elementos. Para aumentar la definición en la capa límite se añadieron 10 capas adicionales en las proximidades de la superficie interior del globo (ver **Figura 14**). De esta manera cuando se obtengan resultados la resolución en dicha zona será mayor.

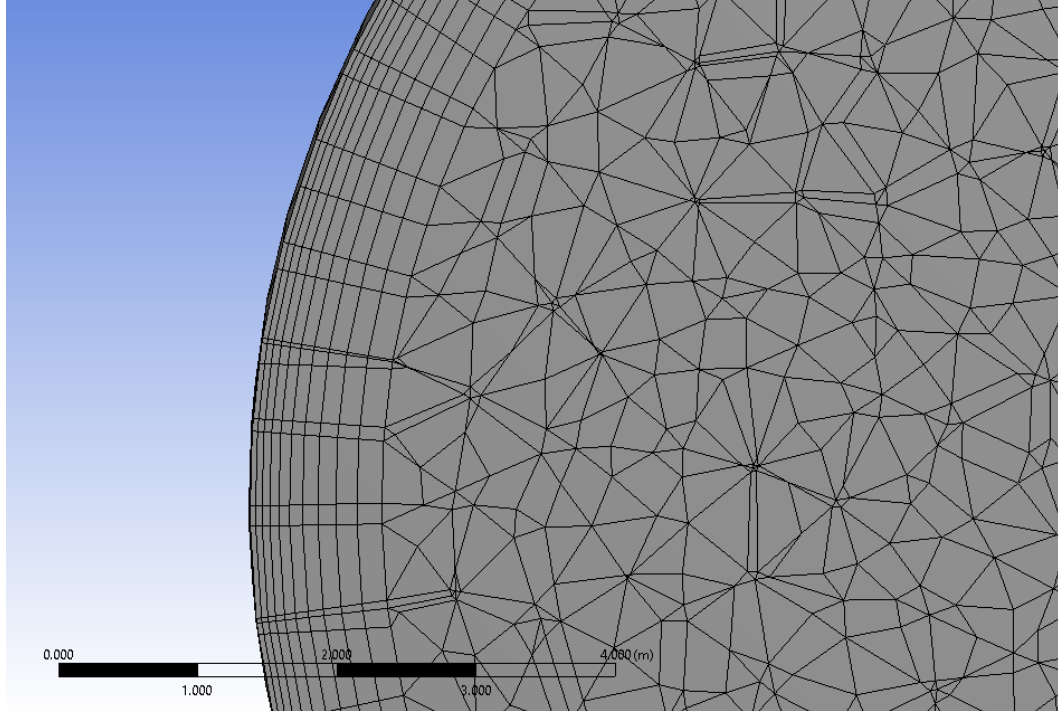


Figura 14. Refinamiento del mallado

Los siguientes apartados están únicamente referidos a FLUENT, dónde se establecerán los principales parámetros que se han definido para la simulación del problema.

5.3 Ecuaciones fundamentales de la fluidodinámica

En cuanto a las ecuaciones de gobierno del fluido, desde FLUENT se han considerado las siguientes [11]:

- Ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (5.1)$$

- Ecuación de conservación del momento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (5.2)$$

- Ecuación de conservación de la energía:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (5.3)$$

Como ya se ha mencionado, se tomará un modelo de gas ideal para calcular la densidad del helio. Esto significa que su densidad será obtenida con la siguiente ecuación [11]:

$$\rho = \frac{P_{op} + P}{\frac{R}{M_w} T} \quad (5.4)$$

Dónde P_{op} es la presión operativa (en nuestro caso la presión del aire en la altura de órbita) y P es la presión estática del volumen de helio.

5.4 Propiedades de los materiales

Para la simulación será necesario definir tres materiales diferentes: helio, hidrógeno y PVF (material de la capa superficial del globo). Las propiedades de los dos primeros materiales se obtendrán de la librería de propiedades del propio programa y se considerará el modelo de gas ideal para el cálculo de su densidad. En el caso del tercer material, se han obtenido las propiedades del estudio de K. Zhao [5], que además se utilizará como referencia en la validación del problema.

TABLA 2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LA SIMULACIÓN

	Helio	Hidrógeno	PVF
ρ (kg/m ³)	Gas ideal	Gas ideal	1580
C_p (J/Kg·K)	5193	Picewise-Polinomial	1506
μ (N·s/m ²)	1.99e-05	8.411e-06	-
k (W/m·K)	0.152	0.1672	0.2
M_w (g/mol)	4.0026	2.01594	-

5.5 El modelo de radiación y condiciones de contorno

5.5.1 El modelo de radiación solar

Para describir la radiación solar se ha utilizado el modelo “Solar Load” de FLUENT y dentro del mismo la opción “Solar Ray Traicing” que tiene en cuenta el calor absorbido debido a la radiación solar directa incidente. En la **Figura 15**, se muestra la configuración del modelo:

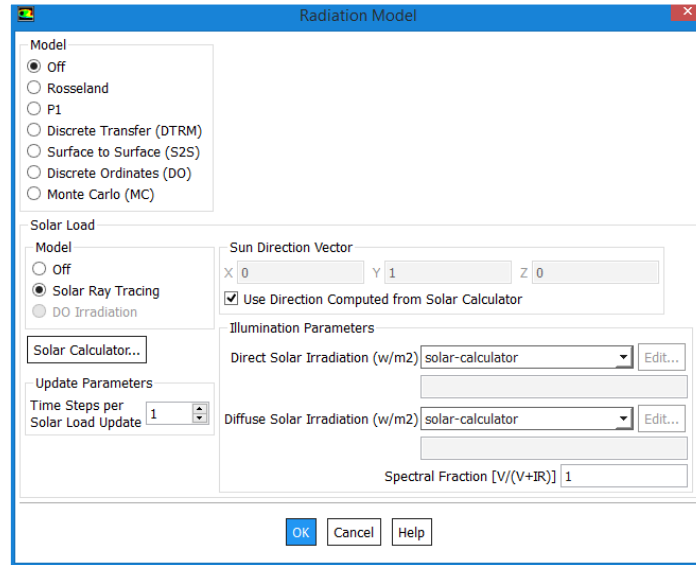


Figura 15. Modelo de radiación solar

El periodo de actualización del modelo se ha establecido en 1 “Time Step” y si nos fijamos en la esquina inferior derecha de la imagen, se observa un parámetro con definición de unidad. Esto se debe a que la radiación infrarroja será incorporada fuera del modelo de radiación de FLUENT (como una condición de contorno). Esto se puede reflejar en la ecuación que define al mismo:

$$SP = \frac{V}{V + IR} \quad (5.5)$$

Dónde SP es el parámetro “Spectral Fraction” (esquina inferior derecha **Figura 15**), V es la radiación solar visible que incide en la superficie e IR es la radiación infrarroja. Además, en la **Figura 15**, se denota que la magnitud del flujo de calor incidente está definida por “Solar Calculator”. Aunque ya se ha mencionado en el apartado teórico, cabe destacar su enorme utilidad para representar casos reales, teniendo en cuenta la

geolocalización y la fecha del vuelo (esto será muy práctico para la validación del próximo capítulo) y la orientación de la malla respecto al sol. Todo esto es visible en la **Figura 16**, siendo importante destacar la configuración del problema bajo “Fair Weather Conditions” que se ajusta más a la realidad que el máximo teórico y un “Sunshine Factor” cuyo valor es la unidad, dado que la simulación mostrada refleja un día despejado en junio.

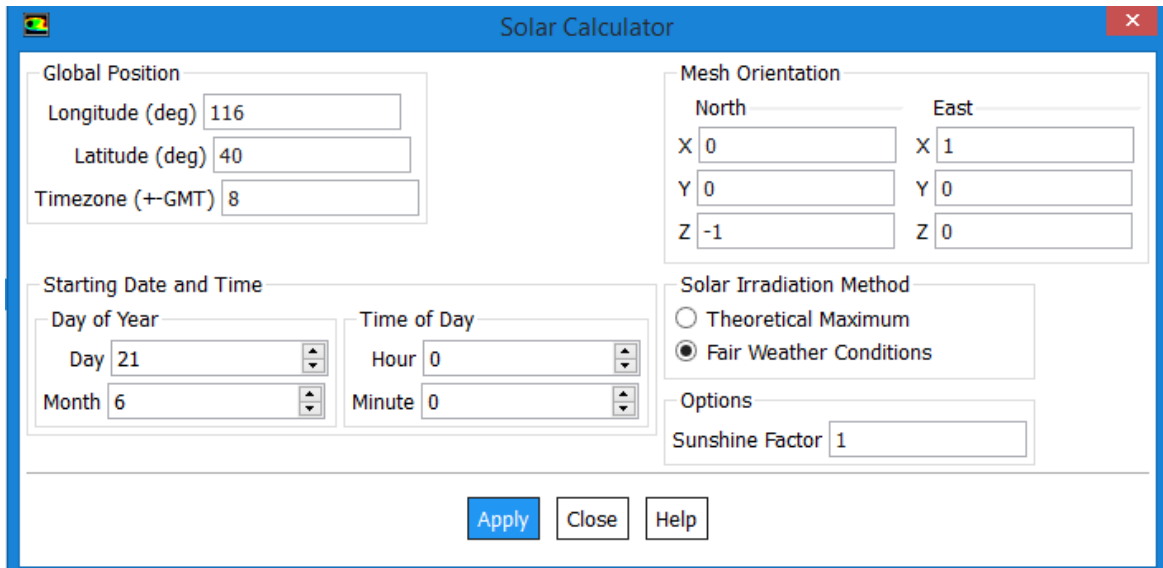


Figura 16. Configuración del Solar Calculator

5.5.2 El modelo de radiación infrarroja y las condiciones de contorno

Todas las condiciones de contorno y la radiación infrarroja han sido especificadas en el módulo “Boundary Conditions” de FLUENT. No obstante, la presión a la que se encuentra el globo durante su órbita ha sido especificada en “operating conditions”, así como el eje y el valor de la gravedad (eje y, -9.81 m/s^2). Además, cabe destacar que, aunque el programa nos exige una temperatura de referencia para el modelo de “Boussinesq” esta es irrelevante en la simulación, dado que definimos la densidad del material bajo el modelo de gas ideal.

Es gracias al módulo de “Boundary Conditions”, dónde podemos tener en cuenta la conducción acontecida en el material pese a haber definido únicamente un volumen en el problema. Si definimos la capa externa del volumen como “wall”, podemos especificar tanto el material como el espesor de este. Tanto esto como los diferentes parámetros que

intervienen en la transferencia de calor, son recogidas en las configuraciones de “Thermal” y “Radiation” en la capa exterior del globo (ver **Figura 17** y **Figura 18**).

Figura 17. Configuración "Wall_Thermal"

Figura 18. Configuración "Wall_Radiation"

De ambas imágenes conviene destacar que la radiación infrarroja ha sido implementada como una UDF (User Defined Function, ver ANEXO A. UDF PARA RADIACIÓN INFRARROJA) en el apartado de “Heat Generation Rate”, tanto su código como su explicación son visibles en el anexo. Este método para implementar la radiación infrarroja está basado en el estudio de A. Fritz y Y. Woldu [13]. Además, el valor del coeficiente

de transferencia se obtiene como se indicó en el Capítulo 4 (ver página 19) y el resto de las propiedades presentes se caracterizan en función de la altura de órbita y del material que se utiliza.

5.6 Configuración del “Solver”

En la configuración del “Solver” deben estar activadas las opciones de régimen transitorio, “pressure-based” y la formulación de la velocidad en términos absolutos. Además, se utilizará el modelo de turbulencia “k-epsilon”, y la configuración del módulo “Solution methods” será la siguiente (términos de segundo orden):

Solution Methods

Pressure-Velocity Coupling

Scheme
SIMPLE

Spatial Discretization

Gradient
Least Squares Cell Based

Pressure
PRESTO!

Density
Second Order Upwind

Momentum
Second Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy
Second Order Upwind

Transient Formulation
Second Order Implicit

☐ Non-Iterative Time Advancement

☐ Frozen Flux Formulation

☐ Warped-Face Gradient Correction

☐ High Order Term Relaxation Options...

Figura 19. Configuración de módulo "Solver"

La inicialización del problema se hará de manera híbrida y para considerar el período de 24 horas, realizaremos 100 “Time Steps” cuya medida o “Step Size” será de 900 s. Esto equivale a un período total de 25 horas, lo que nos asegura que los resultados obtenidos en la primera hora de iteración sean los correctos.

CAPÍTULO 6: VALIDACIÓN DEL MODELO Y RESULTADOS

En este capítulo se compararán los resultados obtenidos con los publicados por K. Zhao [5] el cual contiene una simulación contrastada con datos reales para predecir el gradiente de temperaturas en la capa superficial del globo. Además, se proporcionará información sobre las diferentes caracterizaciones derivadas de la simulación principal.

6.1 Validación del modelo

Para validar la simulación se ha tomado como referencia el trabajo de K. Zhao [5], el cual desarrolla una simulación capaz de calcular el gradiente de temperaturas en la capa exterior del globo durante 24 horas. En esta simulación se consideró una órbita a una altura de 20,000 metros en los cielos de Pekín, China. Además, se estimó un viento de 25 m/s continuo durante todo el periodo, un espesor del material PVF de 2 mm, la emisividad y absorptividad infrarrojas iguales con valor de 0.86 y la absorptividad a la radiación solar 0.3. De esta manera se han definido una serie de “parámetros característicos” del problema para realizar la simulación:

TABLA 3. PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DE LA ÓRBITA A 20,000 METROS

Temperatura (K)	216.65
Presión (Pa)	5529.845363
h_{ext} (W/m ² K)	1.268217
Latitud	116°
Longitud	40°
GMT	+8
Sunshine Factor	1 (Cielo despejado)
Día	6 de Junio

Una vez hecha la simulación con estos datos, procedemos a comparar los gradientes de temperatura presentes en la superficie exterior del globo.

Los contornos de temperatura presentes en el globo a las 09:00 AM, a las 12:00 PM y a la 01:00 AM han sido considerados para la validación.

- 09:00 AM: las 09:00 es la primera hora del día en la que se aprecian diferencias realmente notables en la temperatura de la capa exterior del globo. En ambas simulaciones se puede observar que el gradiente de temperaturas tiene la misma distribución, foco caliente en la zona más alta del globo y foco frío en la inferior. El foco caliente se irá desplazando acompañando el movimiento del Sol respecto del globo de este a oeste, o de derecha a izquierda en la imagen. Además, aunque para las simulaciones de este documento se ha decidido utilizar un rango de temperaturas local (se utiliza como valor límite los presentes en la zona de estudio), es notable observar que el valor de la temperatura máxima no es muy distante al del modelo tomado para la validación.

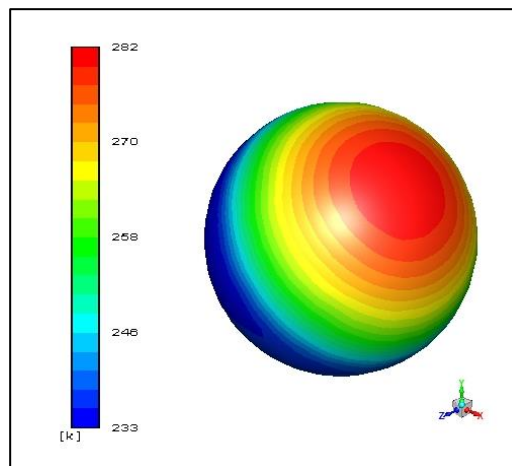


Figura 20. Distribución de la temperatura en el globo a las 09:00 AM

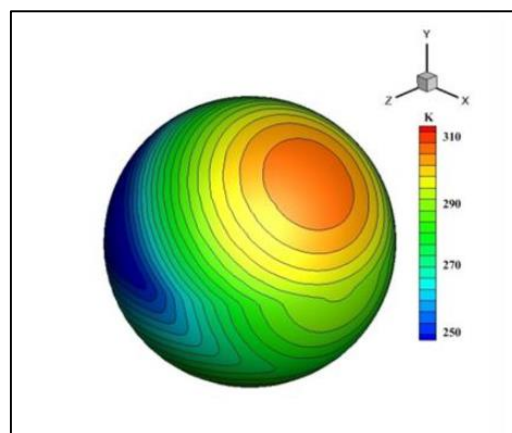


Figura 21. Distribución de la temperatura en el globo a las 09:00 AM según Kun Zhao [5]

- 12:00 PM: Las 12:00 PM es el momento más crítico de todo el período estudio, debido a que se alcanza la temperatura más alta. Por tanto, es el momento óptimo para estudiar el posible sobrecalentamiento del material en el que se alcanza un pico de 288 K en la simulación respecto a los 310 K del modelo de validación. Existe también una leve diferencia en las temperaturas en la parte inferior del globo, la cual puede ser originada por los diferentes métodos seguidos para el cálculo de coeficientes convectivos y, sobre todo, el modelo de radiación infrarroja implementado (ver ANEXO A. UDF PARA RADIACIÓN INFRARROJA).

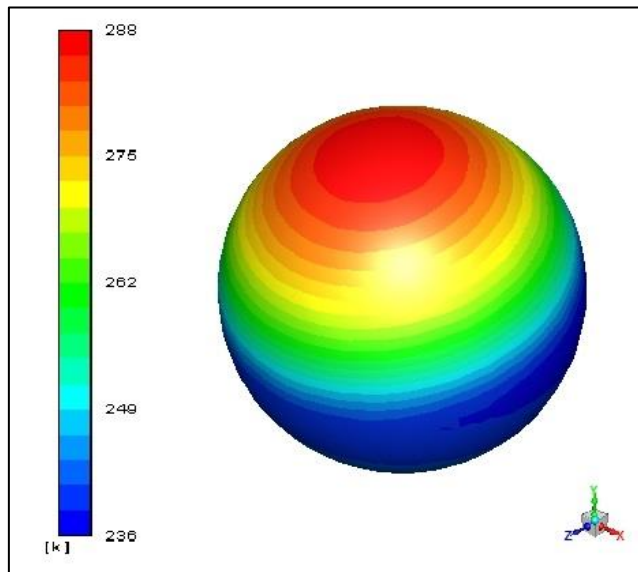


Figura 22. Distribución de la temperatura en el globo a las 12:00 PM

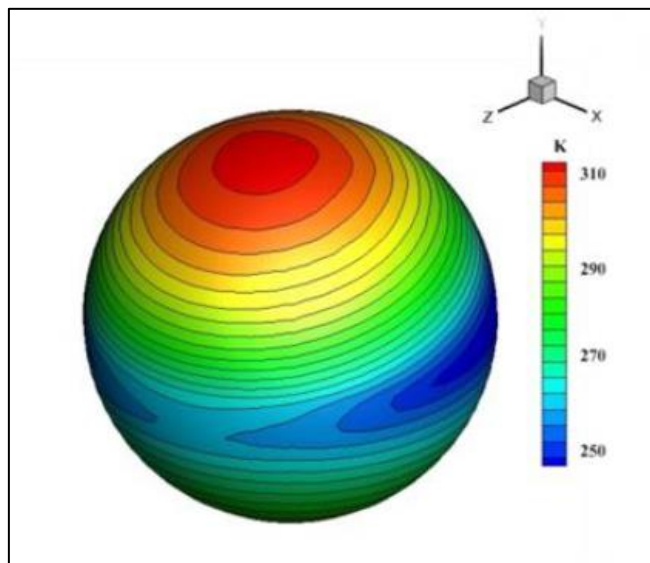


Figura 23. Distribución de la temperatura en el globo a las 12:00 PM según Kun Zhao [5]

- 01:00 AM: Durante esta hora, el material del globo alcanza una temperatura mínima debido a la nula radiación directa que llega a su superficie y la corriente de aire exterior que lo enfría hasta alcanzar un equilibrio. Es importante destacar que el gradiente de temperaturas es completamente opuesto al de las anteriores imágenes; es decir, ahora el foco frío se encuentra en la parte superior del globo y el foco caliente en la parte inferior. Esto se debe a la radiación infrarroja que calienta la parte inferior y provoca dicha distribución.

Nota: Para poder apreciar con mayor claridad la distribución de la temperatura, la perspectiva de las imágenes ha sido modificada (ver esquina inferior derecha en *Figura 24*).

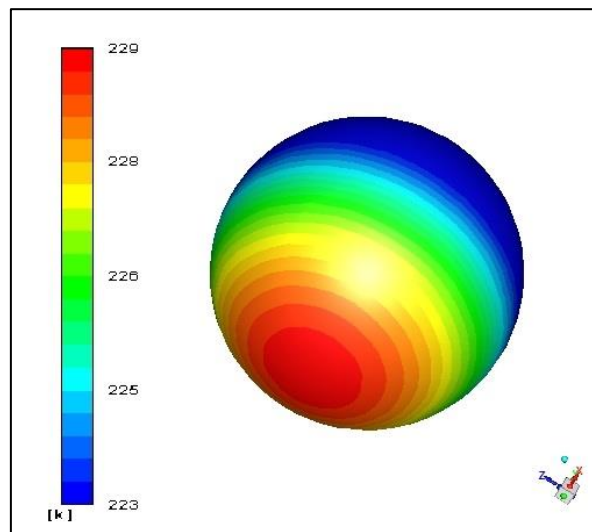


Figura 24. Distribución de la temperatura en el globo a las 01:00 AM

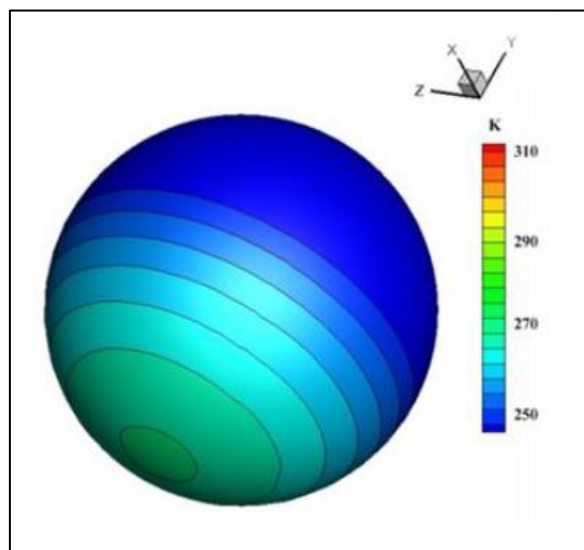


Figura 25. Distribución de la temperatura en el globo a las 01:00 AM según Kun Zhao [5]

Tras evaluar la similitud de las imágenes podemos concluir que la distribución de temperaturas sigue una distribución bastante similar. Sin embargo, es complicado distinguir a simple vista el valor exacto de las temperaturas, por lo que es conveniente realizar una comparación más precisa. Para ello se ha desarrollado una gráfica que compara las temperaturas máximas y mínimas presentes tanto, en la capa exterior o “envelop”, como en el volumen del helio.

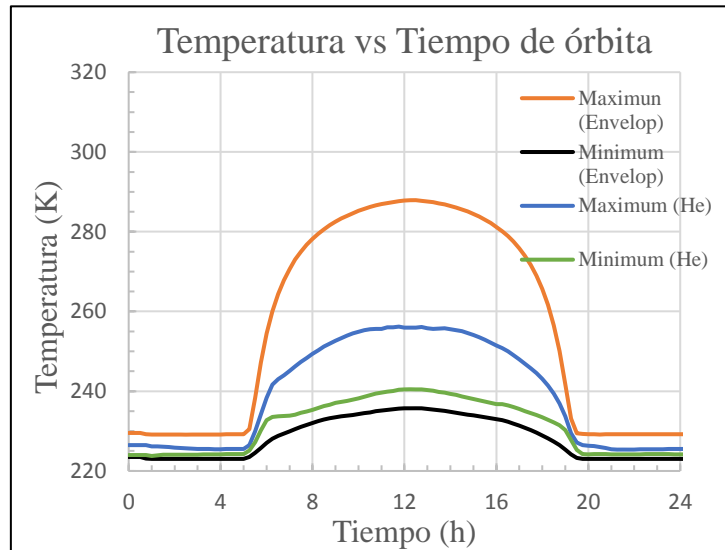


Figura 26. Máxima y mínima temperatura del globo durante su órbita

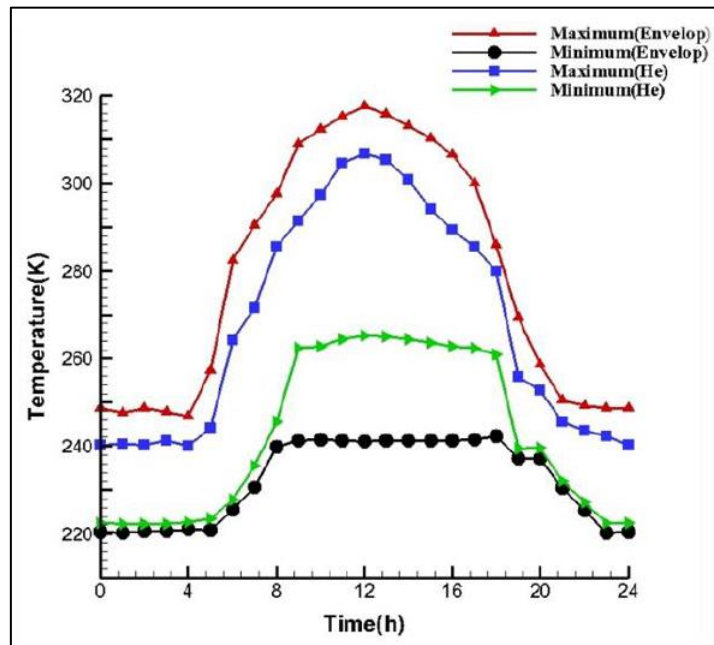


Figura 27. Máxima y mínima temperatura del globo durante su órbita según Kun Zhao [5]

Como ya se había previsto existe una leve discrepancia, más concretamente un error relativo sobre la temperatura máxima del 6,45 % en la parte crítica del día. Además, hay una notable diferencia en el valor de las temperaturas en el gas interior. Esto puede ser debido a las simplificaciones que se han tomado a la hora de plantear el problema, como, por ejemplo, el método analítico empleado en el cálculo del coeficiente de convector externo.

También es interesante destacar, que otros estudios realizados en la misma materia como el de A. Fritz y Y. Woldu [13], ya habían obtenido una temperatura máxima menor (290 K) a la del modelo utilizado para la validación. Por todo ello consideraremos que la simulación realizada es bastante fiel a lo que acontece a la realidad.

6.2 Convección natural

La convección natural ocurre en el interior del globo debido al desplazamiento originado por la diferencia de densidades en las partículas del helio. Esta diferencia está causada, por la distribución de temperatura no uniforme en el volumen del fluido. Si cortamos el volumen por el plano XY en el origen de simetría, se pueden obtener contornos de temperatura como el siguiente:

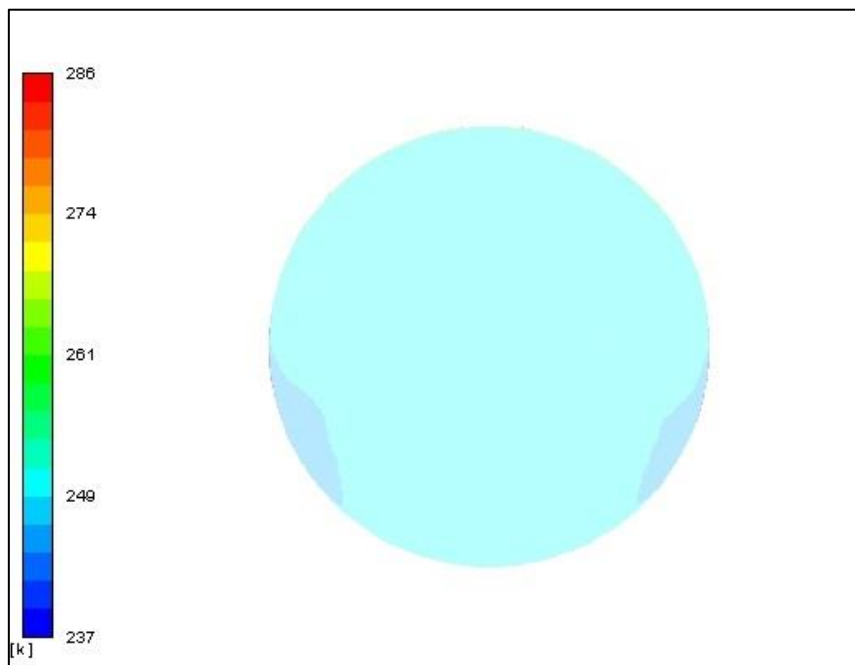


Figura 28. Contorno de Temperatura en el plano XY a las 12:00 PM

La imagen se ha tomado a las 12:00 PM, cuándo como se ya se había mencionado la temperatura máxima es de 288 K. La distribución de temperaturas en el volumen de Helio es homogénea, con un foco caliente en la parte superior, debido a la incidencia de la radiación (ver **Figura 22**). Sin embargo, se aprecian dos zonas (marcadas con un círculo) en la parte inferior del globo con menor temperatura. Esto es más aparente si observamos el vector velocidad de las partículas del plano.

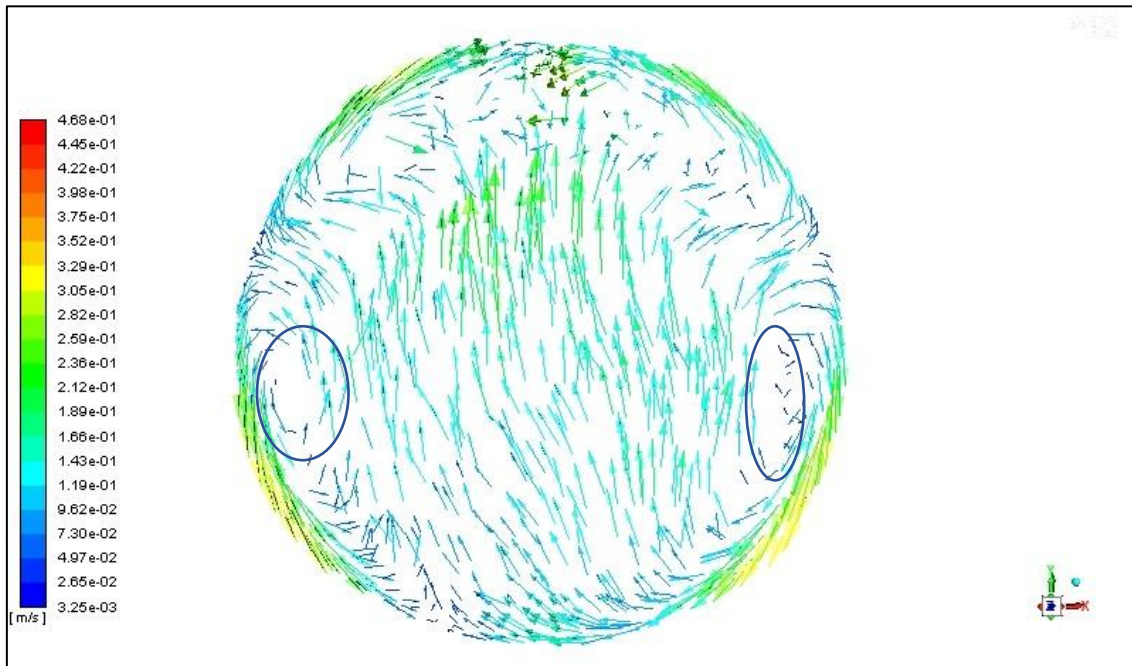


Figura 29. Vector velocidad de las partículas del globo en el plano XY a las 12:00 PM

En la **Figura 29** se aprecia como las partículas de la parte central del globo se calientan y ascienden (vector con dirección eje Y y sentido positivo), debido al calentamiento provocado por la radiación solar. Además, es de nuevo evidente, dos zonas de recirculación (velocidad aproximadamente nula) que se corresponden con las de menor temperatura en la **Figura 28**.

6.3 Verano vs Invierno

En este apartado se evalúa el cambio en la radiación debido al día de vuelo afecta a la distribución de temperaturas. El gas elegido ha sido Helio, la altura de órbita vuelve a ser 20,000 metros y el lugar de vuelo ha sido modificado a Leganés (latitud 40.33258 ° y longitud -3.765128 °). Para ello se han preparado dos simulaciones, una correspondiente al día 1 de enero y otra al día 6 de junio.

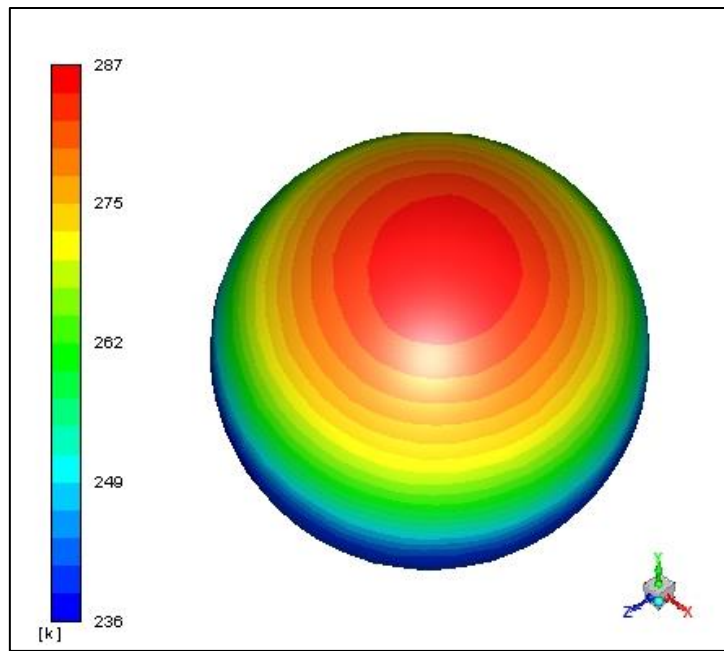


Figura 30. Distribución de la temperatura en Verano a las 12:00 PM

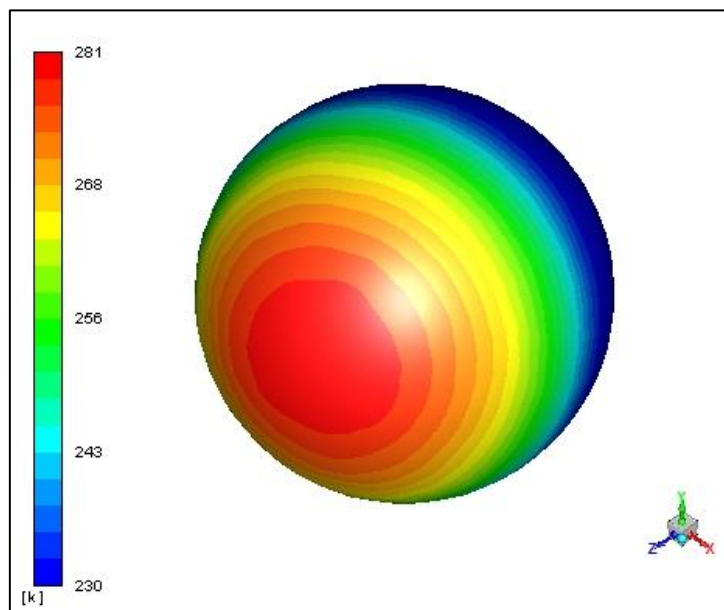


Figura 31. Distribución de la temperatura en Invierno a las 12:00 PM

Como se puede apreciar en la **Figura 30** y la **Figura 31**, el foco caliente del globo cambia su posición en función del día y la hora en el que se observa. Los resultados muestran como durante el verano los rayos solares inciden de manera más directa en el globo calentando su parte superior, mientras que en invierno el foco caliente se localiza en la parte frontal. También es necesario destacar una leve diferencia en la temperatura máxima en la capa superficial del globo (6 K). Además, se puede apreciar como el foco se encuentra

ligeramente desplazado a la parte izquierda del globo en invierno, lo que nos indica que el número de horas solares es menor (el foco ha recorrido la mayor parte de su trayectoria diurna). Esto se debe al mismo motivo que origina la presencia de estaciones, la inclinación del eje de la Tierra y su movimiento de translación respecto al sol.

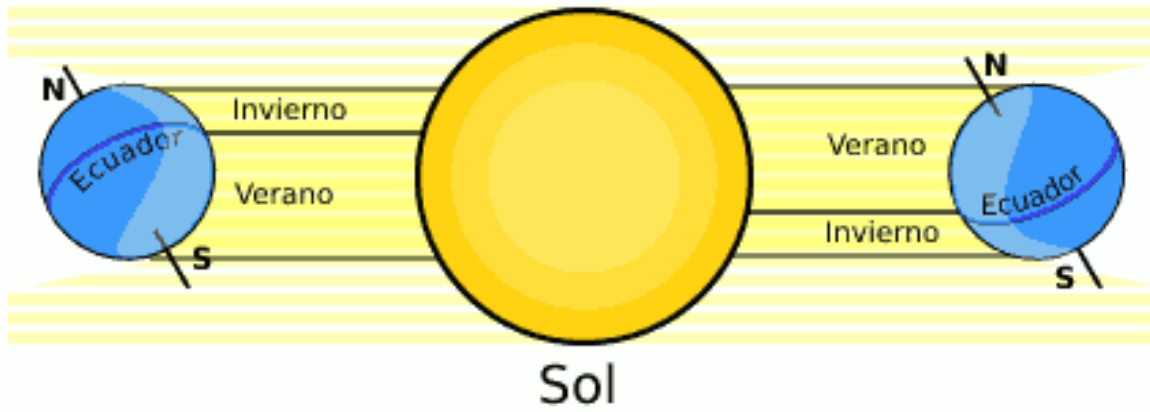


Figura 32. Incidencia de los rayos solares en invierno y verano [19]

Cómo se observa en la Figura 32 durante el verano los rayos solares con un ángulo casi perpendicular sobre la superficie lo que provoca un aumento de las temperaturas. Es precisamente esta variación del ángulo de incidencia lo que provoca que el foco se desplace en las dos simulaciones.

6.4 Órbita a 32,000 metros de altitud

En la última simulación se pretende confirmar si la suposición del apartado 4.2 es cierta. Es decir, confirmar si la temperatura media en la capa superficial es mayor en las órbitas de mayor altitud. Para ello se modificará la altitud a 32,000 metros, lo que provoca variación en la temperatura, presión y coeficiente convectivo. El resto de los parámetros tanto de localización, como geometría y materiales, se consideran iguales a los ya utilizados en la validación del modelo.

TABLA 4. PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS PARA UNA ÓRBITA A 32,000 METROS DE ALTITUD

Temperatura (K)	237.62
Presión (Pa)	866.5095
h_{ext} (W/m ² K)	0.07509467

A continuación, se adjunta una gráfica que evalúa la temperatura media de la capa superficial en ambos casos.

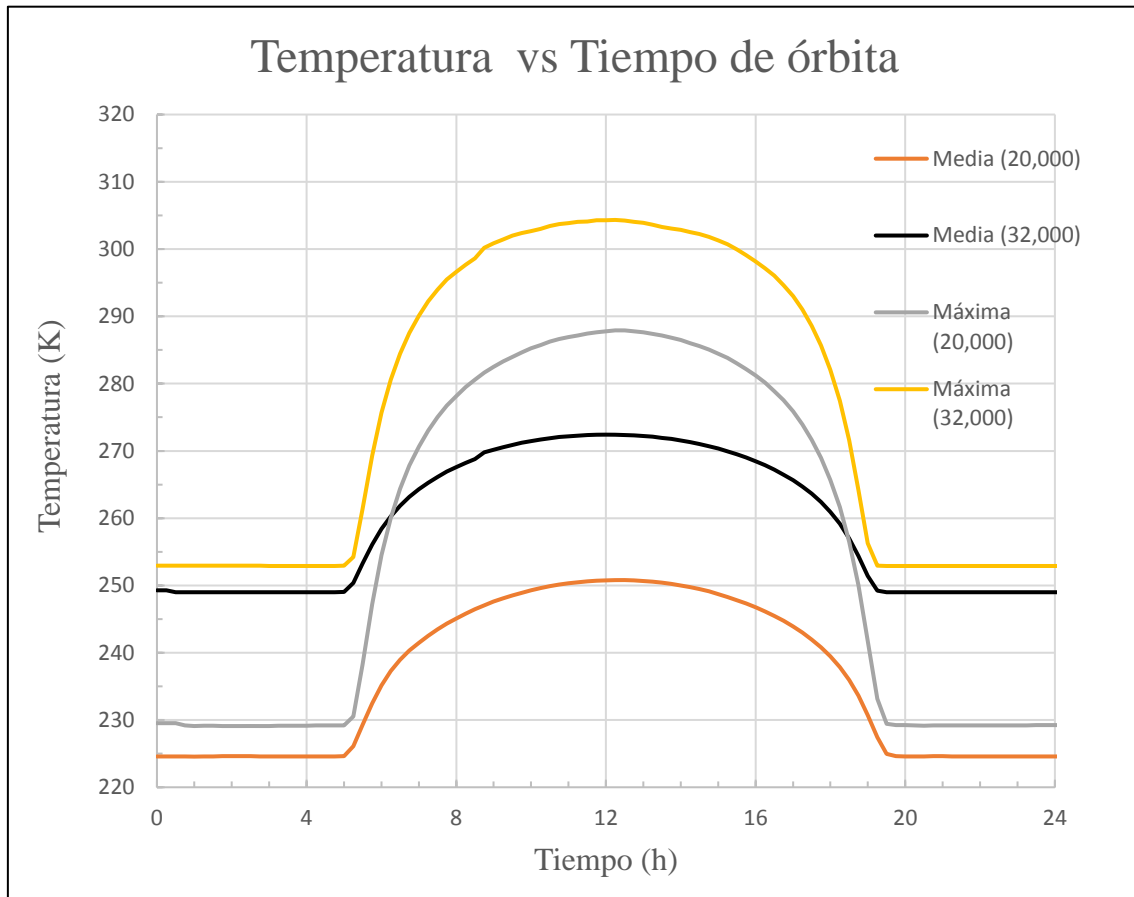


Figura 33. Temperatura media y máxima de la capa superficial a diferentes alturas de órbita

Por tanto, la hipótesis establecida se comprueba, el coeficiente convectivo disminuye cuanto más lejos se encuentra la órbita de la superficie terrestre lo que provoca que la temperatura media aumente. Además, se observa que la temperatura máxima también aumenta, por lo que podemos concluir que el sobrecalentamiento será peor cuándo el globo trabaje a alturas de órbita mayores.

6.5 Helio vs Hidrógeno

Bajo las mismas condiciones que en el apartado 6.1, se ha desarrollado una simulación en la cual se utiliza hidrógeno en lugar de helio (misma geometría y altura de órbita). La distribución del gradiente de temperaturas era exactamente igual a la ya vista, por lo que

no se ha considerado relevante. Sin embargo, si analizamos el valor exacto de las temperaturas durante las 24 horas obtenemos la siguiente gráfica:

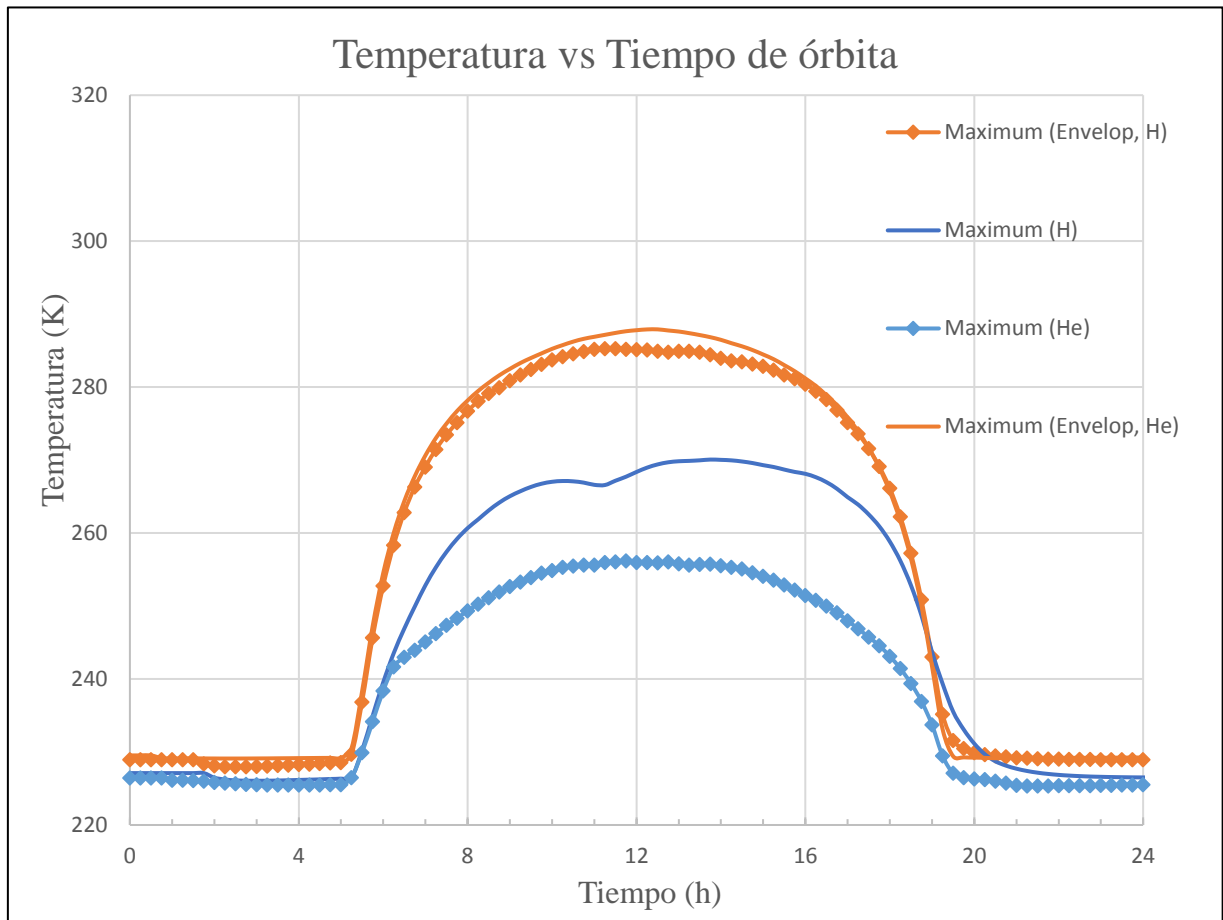


Figura 34. Máxima temperatura en el exterior e interior del globo durante la simulación con hidrógeno

En la **Figura 34**, es inmediato notar que la parte más caliente del globo sigue siendo la capa superficial con un valor cercano a los 285 K. Además, alcanza temperaturas más altas en el gas interior, en torno a 20 K más. Esto sumado al ya citado problema de la flamabilidad podrían ser decisivos a la hora de planificar futuros vuelos con este gas.

CAPÍTULO 7: MARCO REGULADOR, PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO

7.1 Marco Regulador

Como se trata de un proyecto de carácter teórico no existe una normativa aplicable para la simulación de transferencia de calor. Sin embargo, es necesario realizar varios incisos debido a que han utilizado datos experimentales en el apartado 4.1.

Cuando se realiza una misión de vuelo con un globo de gran altitud, se deben notificar todos los datos de su misión (día de despegue, itinerario previsto, objetos a bordo, ...) a las autoridades aéreas pertinentes. Estas regulaciones cambian en función del país tanto para su despegue como para su funcionamiento.

En el caso de realizar la misión en España se debe notificar a la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AENA) [20] , rellenando un formulario de solicitud que verifique que la Ley 48/1960 de Navegación Aérea y el Decreto del Ministerio del Aire (13 de Agosto de 1948). Como ya se ha mencionado en el formulario se deben destacar los datos característicos de la nave y un justificante de la concertación de los seguros necesarios, tanto aquellos remitidos por el Reglamento (CE) del Parlamento Europeo como aquellos recogidos en el Decreto del Ministerio del Aire y en el B.O.E (Real Decreto 37/2001).

Lo más importante además de verificar que se cumple toda la normativa, es tener en cuenta que el plazo de tramitación de la solicitud es de tres meses y que la autorización se concede al conjunto de la empresa que desee realizar la misión (necesitando formularios más sencillos para misiones posteriores).

7.2 Planificación

La planificación del proyecto se ha llevado a cabo utilizando el Diagrama de Gantt. Para tratar de adaptarse al curso académico 17/18 se planteó de manera que el desarrollo principal se llevara a cabo durante el verano de 2018. En la **Figura 32**, se expone el Diagrama de Gantt comprendido entre el 15 de Octubre de 2017 y el 20 de Octubre de 2018.

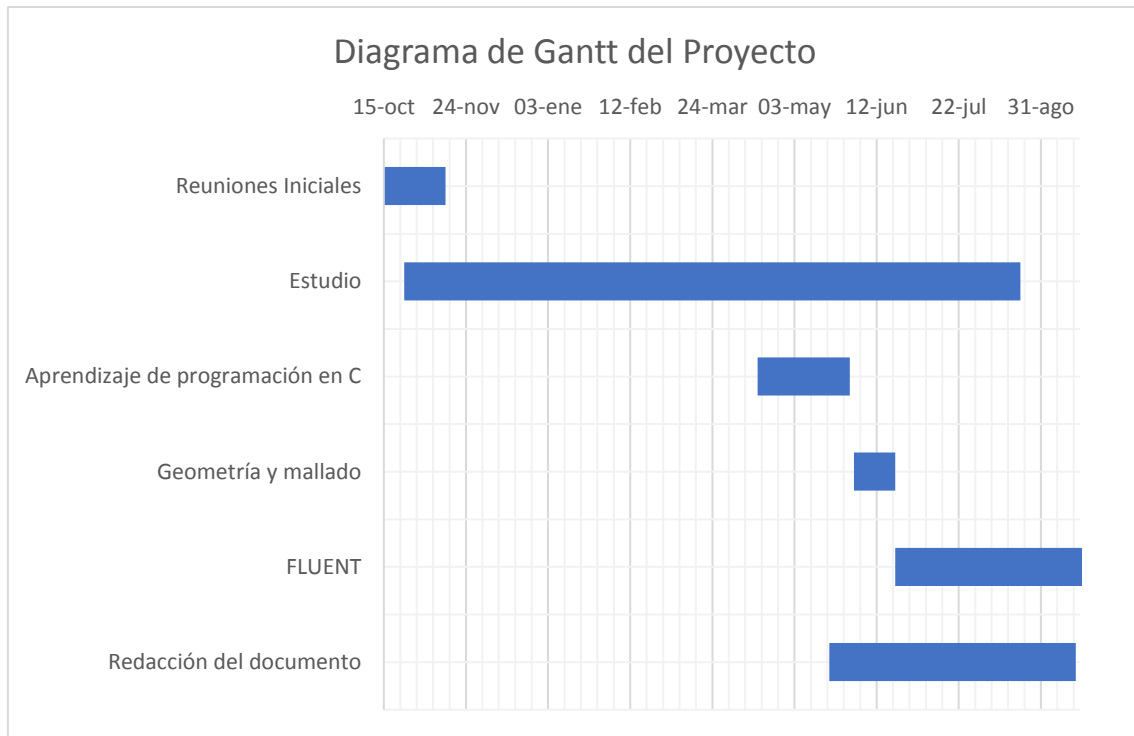


Figura 35. Diagrama de Gantt

En el diagrama se aprecian las actividades principales y el tiempo que se planificó para las mismas. En realidad, el aprendizaje de programación en C llevó menos tiempo del estimado debido a la simplicidad del código implementado. También es importante, resaltar como en un principio el tiempo previsto para el estudio de la geometría era reducido. Esto se debía a su clara simplicidad, sin embargo, cuando se enfrentó la modelización, se empleó mucho más tiempo llegando incluso a contactar con el soporte de ANSYS. El problema era el desconocimiento inicial de la posibilidad de dotar al material de espesor desde FLUENT, una vez ya cerrada la geometría. Esto acabó desplazando el resto de las actividades planificadas, debido a que inicialmente se desconocía la posibilidad de modelizarlo como una superficie en ANSYS, para más tarde indicar su espesor en FLUENT.

7.3 Presupuesto

El cálculo del presupuesto se ha obtenido teniendo en cuenta los costes de mano de obra y la amortización de los equipos utilizados. No se han tenido en cuenta costes derivados como infraestructuras o electricidad. Además, se ha estimado que el sueldo de un ingeniero Junior es de 12 €/hora y el sueldo del tutor es de 60 €/hora. Por último, es

importante destacar que el proyecto se ha hecho utilizando una licencia de estudiante de ANSYS, la cual es gratis y no tiene ningún coste añadido.

TABLA 5. COSTE DE LA MANO DE OBRA

	Mano de Obra		
	Horas	Coste unitario (€/hora)	Coste Total (€)
Alumno	300	12	3600
Tutor/a	20	60	1200
			4800

TABLA 6. COSTE DEL MATERIAL UTILIZADO

	Material utilizado				
	Precio de adquisición (€)	Años de vida	Amortización anual (€)	Tiempo de uso (años)	Precio (€)
Ordenador	1500	5	300	1	300
MacBook Air	1200	3	400	1	400
ANSYS Student	0	-	-	-	-
					700

$$\text{Coste Total} = \text{Mano de Obra} + \text{Material utilizado} = 5500 \text{ €} \quad (7.1)$$

CAPÍTULO 8: CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

8.1 Conclusión

En este documento se ha dado solución a todos los objetivos que se habían planteado. El modelo de la simulación ha sido validado y proporciona datos precisos de la transferencia de calor en el globo. Se debe destacar que se ha simplificado la simulación respecto a los trabajos previos, reduciendo en gran medida el coste computacional y permitiendo el uso de una licencia de estudiante en ANSYS para su resolución.

Es necesario incidir en las simplificaciones o limitaciones del modelo:

1. El tamaño del globo no ha sido estudiado, se ha supuesto un estándar considerado por estudios previos.
2. El modelo considera el globo como una esfera perfecta, despreciando las variaciones que acontecen en su geometría durante su órbita.
3. Se considera altura constante durante la órbita cuando en realidad el globo sufre fluctuaciones.
4. Se ha estimado una velocidad para el viento que puede o no ser verídica (en función de las condiciones variantes).

Las diferentes variaciones de la simulación han servido para ilustrar la dependencia de varios factores en la transferencia de calor durante la órbita. Factores como la altura o el día de vuelo, se han probado determinantes para su estudio. También se han establecido las diferencias que acontecen ante la posibilidad de utilizar helio o hidrógeno para el llenado del globo.

En definitiva, este proyecto expone las principales características del rendimiento térmico en globos de gran altitud en condiciones de órbita, y propone una simulación realizada con el programa FLUENT para analizar el mismo.

8.2 Trabajos Futuros

Son numerosos los posibles trabajos derivados del estudio de un vehículo de investigación científica como es el globo de gran altitud. Es inmediato observar que este documento solo lleva a cabo una simulación para obtener los resultados finales, por tanto, un estudio analítico del problema podría ser interesante para corregir y mejorar el modelo.

También resulta conveniente estudiar el ascenso del globo a la estratosfera. Esto conllevaría un análisis termodinámico, capaz de observar el comportamiento del volumen del globo, además de los ya mencionados modos de transferencia de calor. Para este caso se propone utilizar la nueva herramienta “Dynamic Mesh” que incorpora FLUENT.

Por último, se propone realizar una misión con un globo de gran altitud. La toma de datos experimentales es sin duda alguna, la mejor manera de tratar de comprender con una mayor exactitud el problema y mejorar el modelo desarrollado. Para este trabajo, podría ser útil realizar pruebas con galgas extensiométricas que sean capaces de obtener la temperatura en diferentes puntos del globo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Holly Zell, «NASA, Scientific balloons,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.nasa.gov/scientific-balloons/types-of-balloons>.
- [2] GSBC, «Global Space Balloon Challenge,» 2018. [En línea]. Available: <https://balloonchallenge.org/>.
- [3] Cathey, «The NASA super pressure balloon - A path to flight,» *Adv Space Res*, pp. 44:23-38, 2008.
- [4] L. Q, «A comprehensive numerical model investigating the thermal-dynamic performance of scientific balloon,» *Advance in space research*, nº 53, 2013.
- [5] Kun Zhao, «Superheat simulation of the high altitude scientific balloon during floating flight».
- [6] L. Williams, «NASA,» 16 Mayo 2018. [En línea]. Available: https://www.nasa.gov/centers/armstrong/features/world_view_flight_pairs_sensors.html.
- [7] NASA, «Types of Balloons,» 18 Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.nasa.gov/scientific-balloons/types-of-balloons>.
- [8] S. Churchill, «dailywireless,» 14 Agosto 2013. [En línea]. Available: <http://www.dailywireless.org/2013/08/14/inside-googles-loon-project/>. [Último acceso: 18 Septiembre 2018].
- [9] Farley, «Balloon Ascent: 3-D simulation tool for the ascent and float of high-altitude balloons,» *AIAA*, 2005.
- [10] Zhipeng Duan, «Sphere Drag and Heat Transfer,» *Scientific Reports*, vol. 5, nº 12304, 2015.
- [11] ANSYS FLUENT, «ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide,» [En línea]. Available: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node481.htm>.

- [12] «Solar Calculator,» [En línea]. Available:
http://www.spectralcalc.com/solar_calculator/solar_calc.html.
- [13] Anton Fritz y Yared Woldu, «Using CFD to analyze thermal and optical influence on a zero pressure balloon at floating condition».
- [14] Sou y He, «Aircraft air conditioning systems,» *Press of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004.
- [15] NASA, «Earth Atmosphere Model,» [En línea]. Available:
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/atmosmet.html>.
- [16] Overlook Horizon High Altitude Balloons , «Overlook Horizon,» [En línea]. Available: <https://www.overlookhorizon.com/>.
- [17] ANSYS, «FLUENT DATABASE».
- [18] Frank P. Incropera, Fundamentos de Transferencia de Calor. 4a ed., México: Prentice Hall, 1999.
- [19] «Agrupación Astronómica,» [En línea]. Available:
<https://astroperso.org/2016/12/02/el-inicio-del-invierno/>.
- [20] AENA, «Procedimiento para la obtención de autorización para ejercer actividades de trabajos aéreos con globos (HAB, GB) y dirigibles de aire caliente,» [En línea]. Available:
https://www.seguridadaerea.gob.es/media/4352521/procedimiento_autorizacion_trabajos_aereos_con_globos_y_dirigibles.pdf.
- [21] habhub, «Balloon Burst Calculator,» [En línea]. Available: <http://habhub.org/calc/>.
- [22] Keymont, «Upper Atmosphere Sounding Balloons,» [En línea]. Available:
<https://www.kaymont.com/meteorological>.

ANEXO A. UDF PARA RADIACIÓN INFRARROJA

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE( IR , t , i )
{
    real y[ND_ND];

    // Variables a calcular
    real Q_sup;
    real Q_atm;

    // Datos de partida
    real Boltzmann = 5.6704*pow(10, -8);
    real T_cnegro = 165.8217; // Ec (3.26)
    real Radio = 15.0;
    real Area = 2.8274e3; // Área de la esfera en m^2
    real theta;
    real alpha_s = 0.3;
    real eps_mat = 0.860;
    real P_air = 5529.0; // Presión del aire a 20,000 metros
    real P_0 = 101325.0;
    real T_sup = 288.15;
    real eps_sup = 0.95;

    real tau_IR = 1.716-0.5*(exp(-0.65*P_air/P_0)+exp(-0.95*P_air/P_0)) ; // Ec (3.25)
    real I_IR_sup = tau_IR*eps_sup*Boltzmann*T_sup*T_sup*T_sup*T_sup; // Ec (3.24)
    real IR_atm = eps_mat*Area*Boltzmann*T_cnegro*T_cnegro*T_cnegro*T_cnegro; // Ec
    (3.27)

    real x,z;
    face_t f;
    Q_atm = IR_atm;
    begin_f_loop(f,t) // Comienza una macro para asignar el valor correcto a cada elemento
    {
        F_CENTROID(y,f,t) ; // Obtiene el valor del centro del elemento y lo almacena en un array
        x = y[1]; // Se asigna a x el valor del centro de la primera dimensión
        z = y[2]; // Se asigna a z el valor del centro de la segunda dimensión

        if (x >= -15.0 && x <= 0.0 ) // Para la parte inferior de la esfera
        {
            theta = (x*-1.0)/Radio;
            Q_sup = (theta*alpha_s*I_IR_sup *(Area)); // Ec (3.23)

            F_PROFILE(f, t, i) = (Q_sup+Q_atm); // Ec (3.28)
        }
        if (x >= 0.0) // Parte superior de la esfera
        {
            F_PROFILE(f, t, i) = Q_atm; // Ec (3.28) para la parte con sombra
        }
    }
    end_f_loop(f, t)
}
```